CLUST-ER GREENTECH
ENERGIA E SOSTENIBILITÀ

CLUST-ER BUILD
EDILIZIA E COSTRUZIONI

La Qualità dell'Aria nelle Scuole

Linee guida di indirizzo strategico per un approccio integrato verso il benessere *indoor*.

Sommario

Introduzione 3

1. Scopo e campo di applicazione 4

2. Sorgenti di inquinanti 6

2.a Inquinanti presenti *outdoor* 6
2.b Materiali per l'edilizia 7
2.c Prodotti chimici 9
2.d Persone che occupano gli ambienti 10

3. Metodi per la misurazione degli inquinanti 13

3.a Sensori di I livello 13
3.b Sensori di II e III livello 14

4. Aeraulica 17

4.a Portate di aria di ventilazione 18
4.b Filtrazione 19
4.c Aspetti energetici 19
4.d L'importanza delle fasi realizzative dell'impianto aeraulico 20
4.e Interoperabilità dei dati e sistemi di integrazione 22

5. Raccomandazioni dei Clust-ER Greentech e Build per il benessere *indoor* nelle scuole 24

Allegato 1. Schema di flusso per la valutazione della QAI 26

Approccio integrato alla valutazione dei sistemi per la gestione della Qualità dell'Aria *Indoor* 28
1.a Identificazione del livello di rischio e valutazione degli aspetti relativi alla qualità dell'aria interna in un edificio 28
1.b Misurazione degli inquinanti 28
1.c Raccogliere le percezioni e i reclami delle persone sulla QAI 29
1.d Revisione periodica e gestione dati 29

Allegato 2. Tabelle dei limiti di emissione dei COV definiti dal decreto CAM 30

Allegato 3. Parametri da considerare per la scelta del metodo strumentale utilizzato per la determinazione di sostanze chimiche aerodisperse 31

Allegato 4. Tabelle delle portate dei ricambi di aria per gli impianti di ventilazione meccanica 33

Allegato 5. Tabelle di classificazione dell'aria esterna ed interna secondo la norma UNI- EN 16798 34

Introduzione

L'importanza della Qualità dell'Aria *Indoor* (QAI) e gli effetti sulla salute causati da concentrazioni eccessive di contaminanti nocivi negli ambienti chiusi, dove trascorriamo più del 90% del nostro tempo, sono ampiamente riconosciuti. Per un inquadramento generale della tematica, si veda ad esempio il documento "**Percorso Aria: La qualità dell'aria negli ambienti chiusi**", Clust-ER Greentech (2021).

Ad oggi, sono in elaborazione normative e criteri di valutazione che stabiliscono limiti massimi di concentrazione per le diverse sostanze dannose (tali limiti sono definiti solo per il Radon), ma la norma **ISO EN 16000** (prt 1-42 *in progress*) dà indicazioni su opportuni criteri di monitoraggio indoor orientati al benessere della persona. Esistono, d'altra parte, soluzioni tecniche per alcuni tipi di inquinanti, caratterizzate da vari livelli di complessità, che permettono il **monitoraggio della QAI in tempo reale, con una buona qualità del dato e a prezzi relativamente contenuti**. Inoltre, negli ultimi anni sono state sviluppate numerose soluzioni per il **filtraggio dell'aria** e per l'**abbattimento di sostanze gassose e particolato potenzialmente nocivo**.

Tra gli ambienti particolarmente rilevanti in termini di caratteristiche degli occupanti e di impatto a lungo termine della Qualità dell'Aria *Indoor*, vi sono sicuramente gli ambienti scolastici. Le scuole sono infatti frequentate da soggetti potenzialmente fragili, in numero elevato e per prolungati periodi (circa 1000 ore all'anno per un alunno di scuola secondaria di primo grado).

Gli edifici scolastici sono inoltre spesso inefficienti dal punto di vista energetico e privi di adeguati impianti per il ricambio e il trattamento dell'aria. Per questi motivi, gli ambienti scolastici costituiscono un ottimo caso studio per **implementare sistemi innovativi per la gestione della QAI**, il cui utilizzo permetterebbe di ottenere benefici a lungo termine, partendo da un numero comunque relativamente modesto di interventi.

DOWNLOAD

Percorso aria

Scarica il documento "Percorso aria: La qualità dell'aria negli ambienti chiusi" (Clust-ER Greentech, 2021) all'indirizzo https://greentech.clust-er.it/documenti-e-pubblicazioni/

1. Scopo e campo di applicazione

Questa iniziativa, promossa dal **Gruppo di Lavoro QAI – Qualità Aria Indoor del Clust-ER Greentech**, in collaborazione con il **Clust-ER Build**, intende **offrire un indirizzo strategico e metodologico che, attraverso un approccio integrato, permetta di garantire un reale benessere indoor negli ambienti scolastici**, in accordo con le necessarie misure di **efficientamento e risparmio energetico**.

Si intende proporre un insieme di **metodologie e buone pratiche** in termini di **edilizia** (materiali a bassa emissione, sistemi di ventilazione meccanica forzata ad alta efficienza energetica), **monitoraggio** (sistemi *low-cost* per la valutazione della qualità dell'aria *indoor* e *outdoor*, *big data* e intelligenza artificiale) e **rimedio** (sistemi per il filtraggio dell'aria e dell'abbattimento di sostanze inquinanti) che producano benefici sulla salute degli occupanti.

Il documento si rivolge non solo ai *Facility Manager*[1] o HSE[2] ma anche ai responsabili degli edifici scolastici (Comuni, Province, Dirigenti), agli specialisti che si occupano della valutazione dell'aria interna nelle fasi di progettazione, costruzione, esercizio e uso degli edifici. Si includono anche produttori e distributori di prodotti installati e/o gestiti in ambienti chiusi e possibili utilizzatori, dirigenti scolastici, insegnanti e studenti, che da una acquisizione degli elementi base di valutazione della QAI possono trarre indicazioni per una gestione giornaliera di attrezzature e ambienti, e contemporaneamente acquisire nozioni di comfort e benessere da applicare in generale negli ambienti di vita.

Le linee d'indirizzo del presente documento elaborato dal GdL QAI del Clust-ER Greentech fanno riferimento all' **`ISO 16000-prt 40 I.A.Q.MSSt`**, dove vengono indicati i passi necessari per la corretta gestione della qualità dell'aria in ambienti confinati:

- **Contesto**: una analisi della qualità dell'aria esterna e correlazione alla qualità dell'aria interna
- **Diagnosi**: una analisi delle dotazioni/impianti
- **Test**: una misura della situazione iniziale
- **Rimedio**: un eventuale intervento migliorativo
- **Gestione e Manutenzione**: una manutenzione programmata

[1] Il *Facility Manager* è quella figura professionale che si occupa della gestione degli edifici e di tutti quei servizi strumentali dell'azienda a cui si riferisce. Può essere responsabile di uffici, negozi o stabilimenti, gestendone le manutenzioni e la sicurezza alle telecomunicazioni, i servizi di pulizia o i servizi di mensa. Ha ampie responsabilità che comprendono l'area strategica, di analisi e controllo e gestione-operativa relativamente al patrimonio immobiliare strumentale, ai servizi tecnici, accessori, generali, ecc.

[2] HSE sta per "*Health, Safety & Environment*". HSE Manager è la figura che si occupa della gestione di questi aspetti all'interno dell'ecosistema aziendale di attività e processi.

Figura 1.1: Schema riassuntivo per una corretta gestione dell'aria *indoor.* Per una spiegazione più dettagliata si veda l' 👉**Allegato 1**

2. Sorgenti di inquinanti

Ad esclusione del radon, che ha un'origine strettamente correlata alla litologia dell'area o ai materiali di costruzione, per gli altri inquinanti considerati, **la concentrazione in ambienti** indoor **può risentire dell'influenza delle concentrazioni presenti all'esterno**. Per questo motivo, aprire le finestre per "cambiare l'aria" di una stanza, in certi casi, può produrre effetti negativi per gli occupanti. Nei prossimi paragrafi vengono descritte le principali sorgenti inquinanti degli ambienti *indoor*.

2.a Inquinanti presenti *outdoor*

La ventilazione degli ambienti chiusi è importante per evitare l'accumulo di inquinanti derivanti da sorgenti indoor. Al tempo stesso, l'ingresso di aria dall'esterno, mediante ventilazione naturale (apertura delle finestre), in particolari momenti della giornata e in funzione della localizzazione geografica, può portare ad un aumento dell'inquinamento dell'ambiente indoor, in alcuni casi maggiore del 50%.

Questo dipende dal fatto che l'aria esterna può essere carica di sostanze nocive di vario genere, di origine biologica o antropica.

Le principali particelle biogeniche disperse in atmosfera sono **pollini e spore fungine**, spesso poco considerate ma che rivestono grande importanza poiché, oltre a generare allergie respiratorie in soggetti sensibili, possono aggregarsi al particolato atmosferico aumentandone la massa. In atmosfera sono inoltre presenti anche **composti organici volatili (COV)** di natura biogenica, come ad esempio isoprene e terpeni emessi dalle piante, che per ossidazione producono un aerosol organico secondario, cioè non immesso direttamente, ma frutto di processi di conversione che avvengono in atmosfera.

Gli inquinanti antropici presenti nell'aria esterna sono costituiti principalmente da:

- **Specie gassose**, come: biossido di zolfo (SO_2), biossido di azoto (NO_2), monossido di carbonio (CO), ozono (O_3), benzene (C_6H_6), IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici) e COV.
- **Materiale particolato aerodisperso**: PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1, particelle ultrafini.

In particolare, il PM è una miscela altamente complessa, la cui composizione chimica dipende dalle dimensioni, dalle sorgenti, dal tempo di permanenza in atmosfera, dal trasporto e dalle trasformazioni chimiche che ha subito a causa della radiazione solare e altre condizioni al contorno. La sua composizione è costituita principalmente da materiali carboniosi, tra cui il carbonio elementare (CE) e il carbonio organico (CO) che comprende, fra gli altri, composti come gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA), i quali contribuiscono ad aumentarne il potenziale tossico.

Da un punto di vista epidemiologico, **il PM è ritenuto responsabile di diverse malattie**, in quanto capace di penetrare profondamente nell'apparato respiratorio (particolato fine, diametro inferiore a 2.5 µm, PM2.5), fino agli alveoli (particolato ultrafine, diametro inferiore a 0.1 µm, PM0.1 e nano-particelle, diametro dell'ordine di grandezza dei nanometri, PM0.001) con conseguenti ricadute su altri distretti come ad esempio l'apparato circolatorio, come indicato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS).

Il PM atmosferico e gli inquinanti gassosi, avendo un effetto infiammatorio sulle vie aeree di soggetti sensibili, possono facilitare la penetrazione di allergeni come i pollini e la loro interazione con il sistema immunitario, provocando in questo modo un aumento dell'ipersensibilità del soggetto.

In ambiente urbano la qualità dell'aria è influenzata principalmente da sorgenti emissive locali legate alle attività antropiche, come quelle da combustione (traffico veicolare, riscaldamento civile, combustione di biomassa), industriali, risospensione, ecc..

In prossimità delle strutture scolastiche, il passaggio dei mezzi pubblici e privati, particolarmente intenso in corrispondenza dell'inizio e della fine delle attività didattiche, determina un ulteriore aumento degli inquinanti a causa delle emissioni dei gas di scarico, oltre che emissioni da abrasione e usura del manto stradale (PM di varia natura). Numerosi studi confermano questo modello giornaliero di concentrazioni di inquinanti atmosferici in ambiente urbano, i cui picchi coincidono con gli orari di punta del mattino e della sera.

In ambiente urbano, la gestione della ventilazione, se fatta in maniera naturale tramite l'apertura e la chiusura delle finestre, deve essere effettuata con particolare accortezza, per avere un reale miglioramento della qualità dell'aria indoor.

2.b Materiali per l'edilizia

La qualità dell'aria indoor all'interno degli edifici scolastici, così come in generale per tutti gli ambienti chiusi, è fortemente influenzata dai materiali presenti all'interno dell'elemento costruttivo, siano essi strutturali e parte stessa dell'edificio oppure elementi accessori o di arredo.

Tali elementi, infatti, permangono all'interno delle stanze e dei comparti indipendentemente dalla presenza di fruitori e occupanti, 24 ore su 24 e, in caso emettano sostanze volatili, queste passano nell'aria e tendono ad accumularsi nell'ambiente interno. **Molti sono gli elementi che emettono sostanze nocive come COV o formaldeide**, dalle pitture e vernici alle pavimentazioni, dai rivestimenti agli adesivi utilizzati in edilizia, fino a pannelli in legno, mobili, banchi e arredi scolastici in generale. Questi materiali continuano a emettere anche per molte settimane dopo la loro installazione, a volte per anni, e questo può diventare pericoloso in caso di aule molto piccole, sovraffollate e/o scarsamente ventilate, soprattutto perché queste sostanze si sommano a tutte quelle già presenti nell'aria per i più svariati motivi.

Per quanto riguarda i materiali da costruzione, il mercato e **i produttori si stanno muovendo verso la riduzione dell'emissione di COV**, in particolare per quegli elementi che vengono installati internamente all'edificio.

© Dids / Pexels

Il rispetto del **decreto CAM** (Criteri Ambientali Minimi)[3], necessario per accedere ad incentivi statali o per partecipare a bandi pubblici, prevede ad esempio dei limiti di emissione per queste tipologie di materiali, sia per quanto riguarda i COV totali che per alcune sostanze specifiche, considerate più dannose (es. formaldeide, stirene, ecc.). I test sono eseguiti su campioni di materiale a 28 gg dal confezionamento sulle seguenti tipologie di prodotto:

- pitture e vernici;
- pavimentazioni;
- adesivi e sigillanti;
- rivestimenti interni;
- pannelli di finitura;
- controsoffitti;
- schermi a vapore.

Per essere impiegati in nuove costruzioni o in interventi di riqualificazione e ristrutturazione, i suddetti materiali devono rientrare nei limiti della 👉Tabella 2.1 riportata nell' 👉Allegato 2.

Altra classificazione molto diffusa in Europa, nonché riferimento anche in Italia, è quella indicata dal Regolamento francese sui COV per i materiali da costruzione[4]. Tale regolamento rende **obbligatoria l'apposizione di una etichetta recante la classe di emissione di COV** su gran parte dei prodotti da costruzione installati in interni, pavimenti, rivestimenti, vernici, isolanti, porte e finestre, ecc. Le emissioni di COV sono in questo caso classificate secondo una scala di quattro classi da A+ (emissioni molto basse) a C (emissioni elevate).

Nella 👉Tabella 2.2 dell'👉Allegato 2 sono riportate le sostanze che vengono indagate per determinare la classe di appartenenza e i relativi limiti di emissione.

Infine, i materiali da costruzione talvolta possono rappresentare una sorgente di Radon *indoor*: alcune rocce spesso usate in edilizia, come il tufo, e alcuni materiali da costruzione contengono un tenore significativo di uranio, progenitore del Radon.

2.c Prodotti chimici

Ulteriori fonti di contaminazione *indoor* nelle scuole sono dovute alla presenza di sostanze chimiche nei prodotti per la pulizia, negli odorizzanti/profumatori di ambienti, in insetticidi e anche in materiale didattico e di cancelleria.

Molte di queste sostanze sono tossiche e possono essere assorbite attraverso la pelle e i polmoni con effetti dannosi sulla salute degli occupanti. **Purtroppo non c'è la percezione di tale rischio** e la mancanza di regole sta provocando il continuo aumento di un numero enorme di sostanze chimiche di cui non conosciamo gli effetti sulla salute umana. Quelle maggiormente presenti nei prodotti per pulizia sono: composti alcolici, composti acidi e basici del Cloro, Ammoniaca, idrocarburi derivati dalla raffinazione del petrolio.

Ulteriori sostanze contaminanti indoor sono quelle contenute in prodotti utilizzati per le attività scolastiche quali colle e adesivi, e anche all'utilizzo di strumenti di lavoro come stampanti, plotter e fotocopiatrici. Le sostanze di interesse in questo caso sono COV, Ozono, Formaldeide e polveri.

In numerosi studi sulla qualità dell'aria *indoor* sono state riscontrate anche concentrazioni in tracce di ritardanti di fiamma, ftalati, sostanze perfluoroalchiliche e fragranze sintetiche (Terpeni).

[3] **CAM** - Criteri Ambientali Minimi, aggiornati con decreto ministeriale DM 23 giugno 2022 n. 256, e pubblicati in GURI n. 183 del 6 agosto 2022: 🔗https://gpp.mite.gov.it/PDF/GURI%20183%2006.08.22%20-%20Allegato%20Edilizia.pdf

[4] 🏛25/3/2011 Gazzetta Ufficiale della Repubblica francese **Decreto n°2011 – 321 del 23/3/2011**.

2.d Persone che occupano gli ambienti

Le stesse persone che occupano gli ambienti chiusi possono essere considerate sorgenti di inquinamento che incrementano il livello di rischio legato alla qualità dell'aria. Il contagio influenzale o la trasmissione di agenti patogeni per via aerosol (nube d'aria che emettiamo nella fase di espirazione) sono alcuni degli effetti prodotti dalla presenza di più persone all'interno dello stesso ambiente.

La recente letteratura scientifica si è arricchita — rispondendo all'emergenza da COVID-19 — di materiale che mette in correlazione gli effetti prodotti dalla respirazione (aumento di CO_2) con il rischio di diffusione di agenti patogeni all'interno degli ambienti.

L'incremento di CO_2 in un ambiente confinato utilizzato da persone è, infatti, legato essenzialmente all'attività respiratoria; a mano a mano che il tenore di CO_2 si alza, la probabilità che un individuo inspiri la stessa aria emessa da un altro diventa sempre più elevata.

Se un soggetto risulta portatore di un agente patogeno trasmissibile per via aerea, i quanti virali emessi durante la fase di espirazione sono correlabili al tenore di CO_2 emesso che si mescola all'aria presente. In un ambiente chiuso occupato da persone, il tenore di CO_2 è correlato al tasso di ricambio d'aria che incide sulla probabilità di trasmissione di agenti patogeni.

La qualità dell'aria di un ambiente è strettamente correlata anche alla capacità di mantenere la concentrazione degli alunni durante le lezioni scolastiche. Si è visto che elevati livelli di CO_2 in ambiente *indoor* causano un basso livello di concentrazione e disturbi gravi come mal di testa e nausea (👉Figura 2.1).

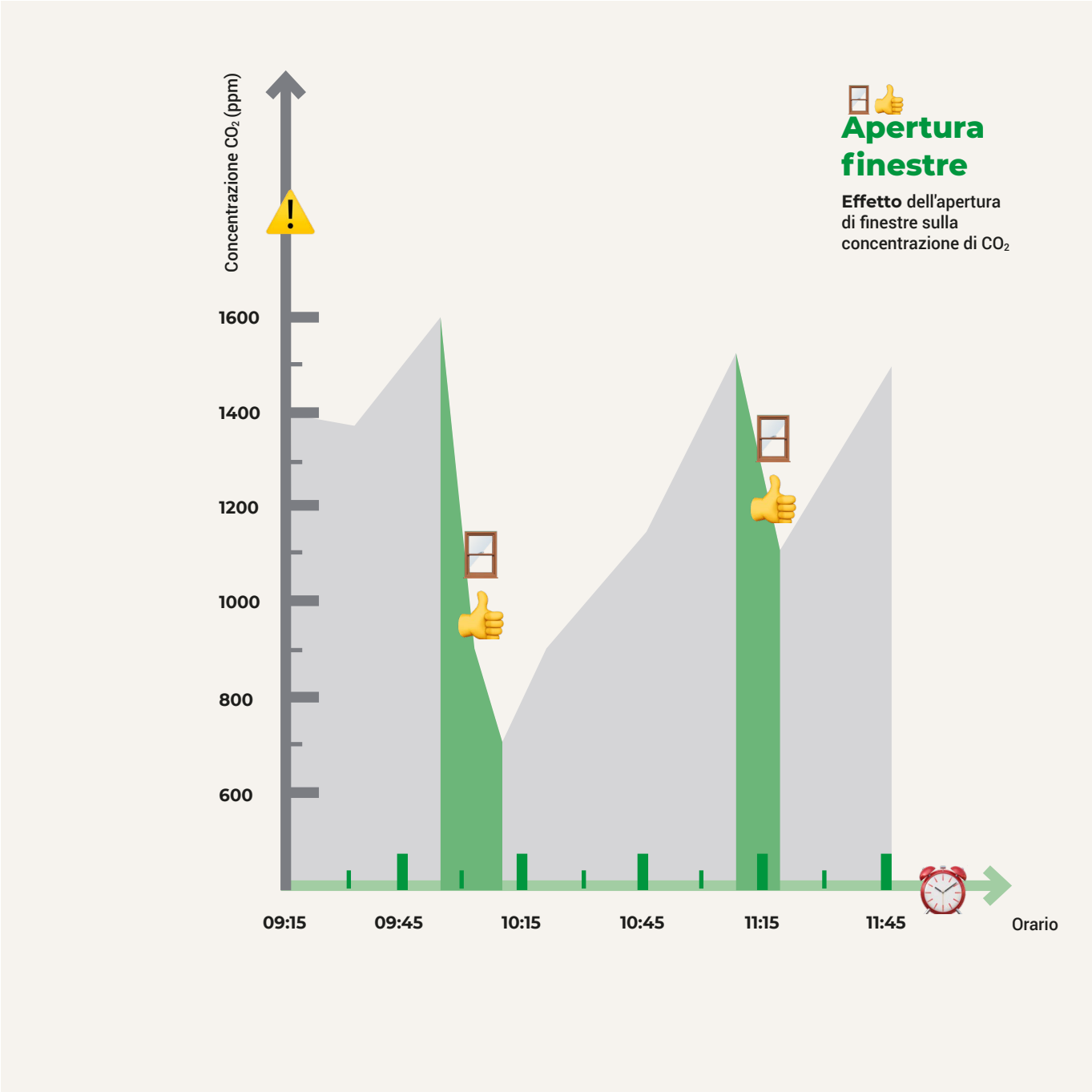
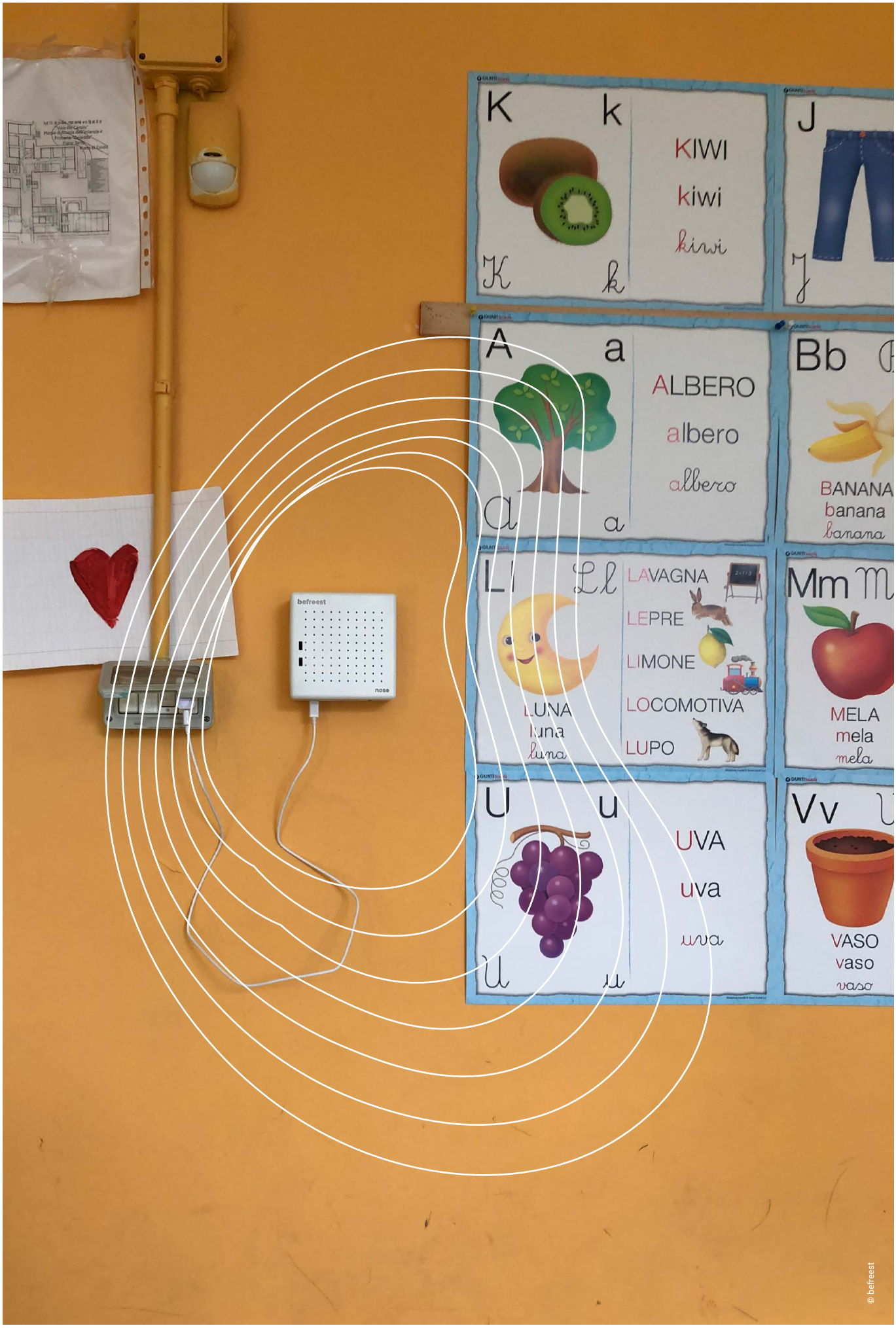


Figura 2.1: Graficocheillustradatirealiacquisitiinaulascolasticadapartedi Proambientenell'ambitodelprogetto CO_2-Lab https://www.consorzioproambiente.it/it/progetti/in-corso/270-cool-co2-lab"

Ricambiare l'aria quando il tenore di CO_2 cresce al di sopra di soglie di rischio è l'azione che riduce in maniera significativa il rischio di diffusione di agenti patogeni aerosol-trasmessi all'interno di spazi chiusi. Tuttavia, occorre verificare con quali azioni si opera il ricambio d'aria, poiché l'introduzione di aria dall'esterno deve avvenire in assenza di ulteriori rischi.

Infatti, in casi in cui gli ambienti siano a contatto con strade trafficate o in ambiti urbani compromessi dall'inquinamento, l'immissione di aria dall'esterno comporterebbe il deterioramento sistematico della qualità dell'aria indoor (ingresso di PM, NOx, benzene, ecc.). Occorre perciò verificare sempre la qualità dell'aria esterna, assicurandosi che l'apertura delle finestre non produca l'effetto contrario a quanto desiderato, aumentando i rischi *indoor*, anziché ridurli.


befreest
K k
KIWI
kiwi
kiwi
J
A a
ALBERO
albero
albero
Bb
BANANA
banana
banana
Ll
LAVAGNA
LEPRE
LIMONE
LOCOMOTIVA
LUPO
LUNA
luna
luna
Mm
MELA
mela
mela
U u
UVA
uva
uva
Vv
VASO
vaso
vaso
© befreest

3. Metodi per la misurazione degli inquinanti

Per la misurazione dei principali inquinanti, esistono sensori di tipologia differente che si distinguono per costo, semplicità tecnologica e affidabilità dei risultati:

I sensori di **I livello** sono dispositivi *low cost* di facile utilizzo che danno indicazioni in tempo reale su situazioni ed elementi critici. Tali sensori, grazie al basso costo e alla risposta fornita in tempo reale, sono **idonei ad essere utilizzati per retroazionare gli impianti di ventilazione e/o filtraggio dell'aria**, permettendone un **utilizzo ottimale** secondo le reali necessità;

I sensori di **II e III livello** sono strumenti certificati che offrono migliore qualità del dato e performance e quindi ad un costo notevolmente maggiore.

3.a Sensori di I livello

Le attuali disponibilità in termini di sensoristica a basso costo, comunicazioni *wired-wireless* (senza fili), risorse computazionali locali e remote (*in cloud*), permettono di realizzare sistemi modulari per il monitoraggio della QAI e del comfort *indoor* con alla base i concetti di **interoperabilità** e **customizzazione**.

L'**interoperabilità** permette al sistema sviluppato di scambiare informazioni con altri sistemi, quali ad esempio:

- **impianti di ventilazione / filtrazione** (p.es. per la retroazione e/o il controllo degli stessi tramite comunicazioni standard MODBUS, RS485 o wireless - IoT);
- **piattaforme remote** (p.es. per la gestione ed elaborazione dati tramite servizi web accessibili da pc, tablet, smartphone);
- **piattaforme locali** (p.es. per la gestione del sistema di monitoraggio tramite *hotspot* o interfacce su rete locale);
- **sistemi per il monitoraggio di inquinanti outdoor** (p.es. per la retroazione e controllo di un impianto di ventilazione/filtrazione tramite elaborazione combinata di dati indoor e outdoor).

La **customizzazione** permette di unire all'interoperabilità la possibilità di integrare sensori per il monitoraggio di I livello a soluzioni specifiche con migliori performance (p.es. la sensoristica di tipo PID - *Photo Ionization Detector* per la misura delle concentrazioni dei COV), aumentando qualità e affidabilità del dato in un unico sistema, valore aggiunto in ambienti sensibili come le scuole, e necessario in funzione del rilascio di future normative che regolamentino il monitoraggio in continuo dei parametri che definiscono la qualità dell'aria negli ambienti *indoor*.

I principali sensori di I livello per il monitoraggio della QAI sono:

- **sensore di CO_2** basato su principio di funzionamento NDIR *dual channel* o fotoacustico, affidabile sul lungo periodo e da calibrare periodicamente esponendolo ad aria *outdoor* (con un valore di CO_2 noto). Accuratezza (±30ppm) adatta per applicazioni di I livello;
- **sensore di TVOC** basato sul principio di funzionamento MOX (I livello) o PID (I-II livello). Il secondo, a fronte di un costo maggiore, non risente della presenza di interferenti quali NO, NO2, CO, è poco sensibile alle variazioni di umidità, garantisce una maggiore sensibilità e una maggiore linearità nella risposta;
- **sensore di PM** (PM1, PM2.5, PM10) efficace per la misura di PM1 e PM2.5, con una minore precisione per i PM10. Risente della presenza di elevati tenori di umidità relativa. Esistono soluzioni tecnologiche alternative che potrebbero in futuro garantire performance migliori.

→ **sensore per il Radon** basato sulla rilevazione di particelle alfa provenienti dal decadimento del radon. Permette di rilevare la quantità di radon presente in un ambiente e segnalare il livello di rischio o attuare sistemi di ventilazione meccanizzata per il ricambio dell'aria.
→ **sensore di T e RH%** (Temperatura e Umidità relativa). In commercio esistono decine di sensori con performance comparabili e integrabili in sistemi per la QAI.

Dal punto di vista delle piattaforme, le tecnologie di interscambio dati (Cloud, API, MQTT) permettono di integrare informazioni provenienti anche da differenti produttori e consentire, quindi, una maggiore libertà di scelta tra differenti produttori. Questo aspetto, tuttavia, non sempre incontra il favore di differenti produttori che spesso costruiscono ambienti informativi proprietari e isolati.

Per aumentare le performances e l'affidabilità dei sistemi di I livello per la QAI è opportuno che i dati forniti dai sensori siano correlati in continuo tra loro e, regolarmente, con strumentazione di II o III livello in-situ (da valutare anche l'utilizzo di bombole di gas campione per calibrazioni speditive), o in atmosfera controllata in laboratorio, al fine di applicare correzioni che migliorino la qualità del dato dal punto di vista quantitativo.

3.b Sensori di II e III livello

Con sensori di II e III livello si intende quella strumentazione che, rispetto ai sensori di I livello, è caratterizzata da un **costo maggiore nonché spesso da una notevole complessità di utilizzo**. Si tratta quindi di strumenti che richiedono l'intervento di figure specializzate, utili per effettuare misure di breve o medio termine caratterizzate da una **ottima qualità del dato,** certificabile secondo diversi standard di riferimento. Inoltre, la misurazione con strumentazione di II e III livello in alcuni casi avviene "off-line", tramite campionamenti in loco e la successiva analisi, in un secondo momento, presso laboratori analitici. Risulta quindi evidente la superiorità della qualità del dato, ma allo stesso tempo anche l'**impossibilità di utilizzare misure di II e III livello per la retroazione in tempo reale e il controllo di sistemi di ventilazione o filtraggio dell'aria**.

I sensori di II e III livello trovano quindi applicazione soprattutto nelle fasi di **valutazione iniziale** della qualità dell'aria negli edifici, al fine di pianificare gli interventi di riqualifica, e nelle **revisioni periodiche** per la valutazione e la gestione del funzionamento degli impianti aeraulici installati.

Per descrivere in maniera esemplificativa la differenza tra metodi di I e di II/III livello si può considerare l'esempio della misura di composti organici volatili COV. Un buon **sensore di I livello** è infatti in grado di misurare con affidabilità e riproducibilità la concentrazione dei **composti organici volatili totali**, cioè dell'insieme di tutti i COV, che possono essere molecole di vario tipo. Ad esempio, elencandone alcuni in ordine crescente di nocività: alcoli, profumi/odorizzanti, terpeni, composti aromatici e formaldeide. Un sensore di I livello può essere quindi in grado di fornire un dato di concentrazione, senza specificare quale sia l'abbondanza relativa dei singoli composti, più o meno nocivi. Un metodo di **III livello**, basato su un campionamento in sacca o in cartuccia seguito da una analisi gas/massa presso un laboratorio analitico **sarà in grado di identificare e fornire la concentrazione di ogni singola molecola**, in miscele composte anche da centinaia di molecole diverse. Risulta quindi evidente la superiorità analitica del metodo di III livello, ma anche come tale tipo di misura, costosa e off-line, non sia utile per una retroazione in tempo reale degli impianti aeraulici di ventilazione o filtraggio.

L'esempio opposto, sempre a titolo esemplificativo, riguarda la misura della concentrazione di CO_2. Si tratta infatti di una singola molecola ben specifica, che è un utile indicatore dell'occupazione di un ambiente, essendo un prodotto dell'espirazione. I metodi di misura più comunemente utilizzati (infrarosso non dispersivo e fotoacustico) sono sufficientemente selettivi, e permettono la misura della CO_2 con ottima affidabilità a un costo di poche decine di euro per sensore. Per la quantificazione della CO_2 non sono quindi generalmente necessari metodi di II e III livello.

In molti casi, la qualità di una misurazione di II e III livello dipende sia dall'abilità dell'operatore, sia dall'affidabilità delle apparecchiature utilizzate. Per una disamina più approfondita delle specifiche problematiche di taratura, calibrazione, ricalibrazione e qualità del dato, si rimanda all' 👉**Allegato 3**.

È importante segnalare che **per alcuni tipi di sostanze di interesse non esiste ad oggi strumentazione di I livello**, il che rende fondamentale una valutazione iniziale, ed eventualmente periodica, della situazione con metodi di II e III livello. Un esempio sono i **bioaerosol**, o particelle primarie biologiche aerodisperse (PBAP: *primary biological airborne particles*): particelle solide presenti in aria derivanti da organismi biologici, compresi i microrganismi (batteri, funghi, virus) e frammenti di materiali biologici, animali e vegetali, come pollini e/o specifici allergeni e patogeni.

L'esposizione a bioaerosol può avere effetti importanti sulla salute, soprattutto su soggetti sensibili, come i bambini. Di solito è necessario caratterizzare il tipo di PBAP, per la presenza di microrganismi infettivi, come ad esempio identificare genere e specie di funghi e batteri allergenici. Per questo motivo, i metodi di misurazione del bioaerosol comportano in genere una prima fase di campionamento del particolato atmosferico (che include il bioaerosol), seguita da specifici metodi di analisi in laboratorio, che includono ad esempio un'analisi al microscopio di batteri e funghi coltivati o delle singole particelle, test biologici antigene/anticorpo o reazioni a catena della polimerasi (PCR). Questo richiede spesso metodi manuali che possono essere dispendiosi in termini di costi e tempo.

Le concentrazioni di bioaerosol *indoor* dipendono sia dalle sorgenti *outdoor* che da sorgenti *indoor*, inclusi gli individui presenti e le loro condizioni di salute.

Poiché le eventuali sorgenti non emettono bioaerosol in modo continuo, e la variabilità delle condizioni ambientali influenza inoltre fortemente la presenza, il trasporto e la diffusione degli agenti biologici negli ambienti *indoor*, la quantità e la qualità degli agenti biologici che si osservano nei diversi ambienti non sono mai le stesse e anche nell'ambito dello stesso locale si rilevano, nel tempo, ampie variazioni delle caratteristiche e delle concentrazioni quali-quantitative[5].

Segnaliamo infine **i sensori di II livello per il Radon**, le cosiddette camere a ionizzazione. Tali strumenti, che garantiscono sensibilità molto alte e campionamenti frequenti (anche ogni 10 minuti), sono costituiti essenzialmente da un volume d'aria delimitato da pareti metalliche e sono in grado di rilevare gli elettroni prodotti dalla ionizzazione da parte del radon e dei suoi prodotti di decadimento.

Per quanto riguarda la misura della concentrazione di Radon è doveroso citare i rivelatori a tracce nucleari che rappresentano in assoluto gli strumenti più diffusi e utilizzati in tale ambito. Si tratta di strumenti passivi che permettono di misurare la concentrazione media su lunghi periodi di esposizione, tipicamente di sei mesi. Al termine del periodo di esposizione tali rivelatori vengono analizzati al microscopio ottico e si ricava la concentrazione media di Radon tramite opportuni fattori correttivi.

[5] (Rapporto ISTISAN 15/4, 2015)

© Dids / Pexels

4. Aeraulica

Gli ambienti confinati, ed in particolare quelli scolastici, richiedono continui e costanti ricambi di aria al fine di eliminare o controllare entro valori consentiti, gli elementi inquinanti garantendo una maggiore salute agli studenti e alle persone che vi lavorano, docenti e personale scolastico.

L'utilizzo di aerazione o ventilazione naturale, intesa come apertura saltuaria delle finestre, si è dimostrata solo parzialmente efficace in questi ambienti, caratterizzati da una presenza continua di molte persone. Oltre a questo aspetto,

la ventilazione naturale comporta altri svantaggi tra cui forti dispersioni termiche nel periodo invernale e quindi maggiori costi di gestione, ingresso di correnti d'aria fredde che diminuiscono il comfort alle persone; ingresso di agenti inquinanti non controllati (polveri sottili e allergeni), esposizione ai rumori esterni.

Al fine di risolvere tali problematiche può essere d'aiuto l'utilizzo di **impianti di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC)** o più in generale di **impianti aeraulici**. Tali impianti, dotati di adeguata **filtrazione** dell'aria in ingresso, consentono un ricambio continuo e controllato dell'aria indoor e possono garantire il controllo termico degli ambienti (riscaldamento invernale e raffrescamento estivo), il controllo della umidità relativa, ottimizzando al contempo anche in consumi energetici.

I sistemi aeraulici prevedono l'immissione di aria pulita esterna e la contemporanea espulsione di aria viziata dai locali. In tal modo risulta possibile diluire ed asportare gli inquinanti presenti negli ambienti interni, limitando la concentrazione entro i valori previsti dalle normative. L'aria esterna deve essere immessa negli ambienti nelle condizioni di minor inquinamento possibile. Per questo motivo occorre posizionare le prese d'aria ad almeno 3 m di altezza dal suolo e a 5 m dalla espulsione ed inserire prima dell'ingresso in ambiente **opportuni sistemi di filtrazione**.

Oltre agli effetti sulla QAI, i sistemi aeraulici possono controllare le condizioni di **comfort termoigrometrico** degli occupanti grazie alla presenza di "batterie" di riscaldamento e/o raffrescamento che consentono di sopperire ai carichi termici interni. Di fatto tali sistemi assumono il ruolo di **impianti di climatizzazione e di condizionamento dell'aria interna**, sostituendosi completamente (o, in alcuni casi, affiancandosi) ai tradizionali sistemi idronici (radiatori, fan coil, pannelli radianti) o condizionatori estivi. Nelle aule scolastiche, inoltre, l'elevato numero di persone presenti contemporaneamente è causa di una forte produzione di vapore che determina un incremento dell'umidità relativa in ambiente, se questo non è adeguatamente ventilato. Valori di umidità relativa superiori al 60-70% possono determinare condizioni favorevoli per la **proliferazione di batteri** oltre a peggiorare la respirazione olfattiva, riducendo anche la percezione di comfort termoigrometrico. Elevati valori di umidità aumentano inoltre il rischio di **formazione di condensa** su superfici fredde, problema che si riscontra in particolare in tutti gli edifici poco isolati termicamente e in presenza di ponti termici, dove la condensa favorisce formazioni di muffe che possono volatilizzarsi anche nell'aria ambiente. L'utilizzo di sistemi aeraulici diventa quindi fondamenta-

le in quanto l'immissione di aria esterna a basso contenuto di vapore (soprattutto nelle condizioni climatiche invernali) consente di ridurre e controllare il valore dell'umidità relativa in ambiente, **migliorando quindi salute e comfort**, e preservando le condizioni delle strutture edilizie.

Esistono diverse tipologie di impianti aeraulici e di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC). Una possibile distinzione è quella tra impianti centralizzati e puntuali.

→ **Impianti VMC centralizzati**: sono impianti a servizio di diversi locali, caratterizzati da una macchina centrale di grandi dimensioni, canalizzazioni per il trasporto dell'aria nelle singole aule/uffici (generalmente distribuite a controsoffitto) e diffusori e griglie di estrazione posti a parete o a controsoffitto. Tra questi impianti occorre distinguere tra quelli dedicati esclusivamente al ricambio dell'aria (impianti aria primaria) in cui il controllo della temperatura ambiente viene affidato ad impianti idronici (radiatori, fan coil, pannelli radianti) e quelli dedicati anche alla climatizzazione (impianti a tutt'aria) in cui l'aria immessa in ambiente consente di controllare la temperatura e l'umidità degli ambienti.

→ **Impianti VMC puntuali**: sono piccole macchine a servizio di singoli ambienti, normalmente alloggiate sulla parete esterna o integrate nel sistema infisso o cassonetto. Queste macchine svolgono normalmente il solo servizio di ricambio dell'aria (eventualmente integrate con recuperatore di calore). Date le loro piccole dimensioni hanno limitazioni sulla portata di aria per cui nel caso di grandi ambienti occorrono più installazioni nello stesso locale.

Nella scelta più appropriata del sistema aeraulico o VMC da adottare occorre prendere in considerazione diversi aspetti, tra cui:

→ portate di aria richieste in funzione degli inquinanti prodotti;
→ tipologia di sistema filtrante;
→ sistemi per il risparmio energetico
→ possibilità di garantire riscaldamento, raffrescamento e controllo umidità relativa;
→ vincoli architettonici interni (disponibilità di spazi per gli impianti) ed eventuale impiantistica preesistente;
→ scelta e posizionamento dei diffusori aria e dei punti di estrazione, in quanto fattori che influiscono sulla efficienza di ventilazione e sulla capacità di tali sistemi di garantire una qualità dell'aria uniforme in tutto l'ambiente;
→ logiche di controllo (su portate di aria, temperatura di immissione, temporizzazioni, ecc.) che consentono di ottimizzare QAI e risparmio energetico;
→ rumorosità degli impianti;
→ aspetti manutentivi e di sanificazione;
→ possibilità di monitoraggio di parametri microclimatici e QAI;
→ costi (installazione + gestione).

Particolare attenzione a livello progettuale deve essere posta ai seguenti aspetti:

4.a Portate di aria di ventilazione

Il quadro normativo attuale è abbastanza complesso in quanto coesistono diversi riferimenti normativi che partono da un approccio di tipo prescrittivo. Per quanto concerne gli edifici scolastici citiamo il **DM 18/12/1975 "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica"** che prevede specifiche portate di ricambio orarie e la norma **UNI 10339 (1995)** sugli impianti aeraulici che, nel caso specifico delle scuole, definisce i valori minimi di ricambio aria per alunno presente all'interno dell'aula. Un recente riferimento normativo è la **EN 16798-1** che definisce sia i valori di riferimento dei livelli di CO_2 all'interno degli ambienti, sia i valori dei ricambi di aria in funzione di diverse classi prestazionali. Queste due ultime normative sono esplicitamente riportate anche nel Decreto **CAM (DM 23 giugno 2022)** il quale ribadisce come sia necessario garantire l'adeguata qualità dell'aria interna in tutti i locali abitabili tramite la realizzazione di impianti di ventilazione meccanica, con riferimento alle norme vigenti. In 👉**Allegato 4** è riportata una sintesi dei valori di ricambio aria proposti dalle citate normative.

Una corretta progettazione, quindi, dovrebbe basarsi su un approccio di tipo prestazionale, andando a definire le portate necessarie di ricambio aria in funzione della reale necessità di diluizione degli inquinanti.

La possibilità, inoltre, di poter monitorare in tempo reale alcuni inquinanti e al contempo l'utilizzo di impianti a portata variabile, consente di modulare le portate di aria nelle diverse condizioni di esercizio, mantenendo valori adeguati di QAI e nel contempo minimizzando i consumi energetici.

4.b Filtrazione

Gli impianti aeraulici sono dotati di opportuni **sistemi di filtrazione** che permettono di trattenere gli inquinanti presenti nell'ambiente esterno in modo da garantire immissione di aria esterna "pulita". La scelta del sistema di filtrazione e delle caratteristiche ed efficienza dei filtri è molto importante e deve essere effettuata in base alle condizioni dell'aria esterna e alle funzioni previste all'interno degli ambienti. La recente **normativa EN ISO 16890-1** permette una scelta più consapevole della tipologia di filtro da adottare in quanto introduce un approccio prestazionale al problema in cui i filtri vengono classificati in base alla loro capacità di abbattere le concentrazioni di PM (nelle frazioni PM10, PM2,5 e PM1). Per un maggior dettaglio si veda l'👉**Allegato 5**.

Tra le altre tipologie di filtri possiamo citare i filtri a carboni attivi che sono impiegati per deodorizzare e rimuovere inquinanti chimici gassosi e trattati a seconda dell'inquinante che devono intercettare (NOx – SOx – CO – COV – benzene – ecc.). Sono inoltre disponibili in commercio altre tipologie di filtrazione, quali filtri biocidi e lampade UV-C2, capaci di eliminare muffe, batteri, virus, funghi provenienti da sorgenti quali l'uomo, gli animali e le piante.

4.c Aspetti energetici

L'ingresso di aria esterna a temperatura diversa da quella interna determina un carico termico per l'impianto di climatizzazione che deve riscaldare (in inverno) o raffreddare (in estate) l'aria con conseguente aumento dei consumi energetici. Questo aspetto è particolarmente significativo nel periodo invernale quando le differenze di temperatura tra aria interna ed esterna sono particolarmente elevate.

La ventilazione naturale (tramite apertura finestre) spesso incontrollata determina elevati consumi energetici. Si può stimare che l'incidenza dei consumi energetici dovuti alla ventilazione naturale in un ambiente scolastico sia dell'ordine del 20-50% rispetto alle dispersioni dell'involucro.

Al contrario, l'uso di sistemi aeraulici dotati di recuperatore di calore, consente di ridurre le perdite termiche fornendo al contempo l'aria necessaria per il controllo della QAI. In questo modo la dispersione per la ventilazione potrà ridursi a 5-10%.

Il **recuperatore di calore a flussi incrociati** determina uno scambio di calore tra l'aria in ingresso e quella di espulsione, senza alcuna miscelazione tra i due flussi. L'aria interna, prima di essere espulsa, rilascia il proprio calore all'aria esterna in ingresso che, anziché entrare fredda (ad esempio in inverno), viene riscaldata determinando quindi un vantaggio sia per la riduzione dei costi energetici sia perché evita correnti fredde in ingresso. Il recupero di energia termica che si può ottenere dipende dalla tipologia di recuperatore e dalla differenza di temperatura tra aria interna ed esterna e può raggiungere anche il 90%. Quando ci sono problemi di spazio e le dimensioni dell'apparecchiatura devono essere più ridotte, si può adottare il **recuperatore di calore rotativo** in cui lo scambio di calore tra i due flussi di aria avviene tramite il materiale con cui è costituita la ruota rotativa.

4.d L'importanza delle fasi realizzative dell'impianto aeraulico

Per ottenere elevati standard di comfort e di qualità dell'aria negli ambienti, in particolare in quelli scolastici, occorre adottare un processo di realizzazione degli impianti aeraulici che va dalla **progettazione,** alla **realizzazione** fino alla **gestione e manutenzione,** che deve rispettare specifici standard normativi e essere seguito in ciascuna fase da professionisti esperti del settore, questo al fine di garantire nel tempo i risultati qualitativi richiesti e previsti in progetto.

Pertanto le fasi fondamentali del ciclo di vita di un impianto aeraulico sono:

→ **Progettazione:** adeguata all'edificio e alle sue finalità finalizzata alla **qualità dell'aria, al comfort e al risparmio energetico.**

→ **Realizzazione:** effettuata secondo progetto da **imprese di comprovata esperienza.**

→ **Gestione:** L'utilizzo dell'impianto deve essere condiviso con l'utilizzatore. **Meglio se la gestione è automatica** in base agli inquinanti e all'uso dei locali, alle temperature esterne ed interne e rispettoso del risparmio energetico.

→ **Monitoraggio:** attraverso **sensoristica nell'impianto e in ambiente** che consenta di controllare i diversi *Key Performance Indicators* (KPI) individuati che sono relativi sia ai parametri di progetto che di funzionalità dell'impianto.

→ **Manutenzione periodica: taratura-pulizia- sanificazione** dell'impianto effettuate periodicamente da professionisti.

Monitoraggio:

→ Qualità dell'aria *outdoor*
→ Consumi energetici
→ Sensori ambientali

Gestione della ventilazione meccanica controllata:

→ Segnalazione in sito della qualità dell'aria
→ Gestione di sistemi di filtrazione
→ Gestione della manutenzione impianti
→ Segnalazione *Push* di situazioni anomale

Elaborazione dati in *Cloud* o in locale:

→ Verifica del rischio
→ Elaborazione scenari di rimedio
→ Archiviazione dati
→ Analisi *Big Data*
→ Analisi predittive
→ Analisi energetiche

***Report* cadenzato sullo stato della qualità dell'aria:**

→ Indicazioni per le strategie di miglioramento
→ Comunicazioni periodiche per gli *Stakeholders* (genitori, insegnanti, lavoratori)
→ Verifica del *Payback* dell'investimento

Figura 4.1: Il modello *smart* per la Qualità dell'Aria *Indoor*.

L'impianto aeraulico, come ogni altra apparecchiatura, **necessita quindi di manutenzione meccanica ed igienica periodica**, per non alterare nel tempo i risultati qualitativi dell'aria *indoor* garantiti dall'impianto nuovo. È necessario controllare periodicamente l'unità di trattamento aria per eliminare ossidazioni e incrostazioni, effettuare la pulizia meccanica interna alle canalizzazioni di distribuzione dell'aria, il lavaggio delle unità terminali e la sostituzione delle tubazioni flessibili oltre al cambio dei filtri usurati e sporchi con filtri nuovi ed efficienti. Infine l'impianto, una volta che è stato pulito, viene trattato con disinfettante battericida. La periodicità degli interventi deve essere valutata di caso in caso in funzione dello stato tecnico-funzionale dell'impianto e delle effettive condizioni di esercizio dell'impianto.

4.e Interoperabilità dei dati e sistemi di integrazione

Nell'ottica di un pieno utilizzo dei dati sulla QAI raccolti dalla sensoristica in situ, e della loro trasformazione in informazioni utili per la gestione dell'edificio in ottica di comfort, salubrità ed efficienza, si rendono necessarie le seguenti caratteristiche:

→ **I dati devono essere convogliati e raccolti in una unica piattaforma informatica**, dove poter svolgere analisi, valutare i KPI, creare allarmi statici e dinamici rispetto ai dati monitorati ed eventuali scostamenti, creare automazioni in ottica efficienza e salubrità, consentire-registrare una corretta e puntuale manutenzione dell'edificio e dell'impiantistica installata;

→ Insieme ai dati sulla QAI, in ottica di sostenibilità, **è utile raccogliere i dati relativi ai consumi delle macchine interconnesse** che sono utilizzate per riscaldamento, raffrescamento, ventilazione ed aria condizionata, per creare algoritmi in ottica di comfort, salubrità ed efficienza per migliorare sia la qualità di vita all'interno dell'edificio, ma anche per rendere efficiente l'utilizzo dell'energia per ottenere tale comfort;

→ Alla luce del fatto che il consumo HVAC[6] in numerose tipologie di edifici in cui è necessario valutare la QAI si presenta come uno dei maggiori consumi (nell'ordine del 30-50% sul totale), **si consiglia la approfondita valutazione dell'installazione di impianti alimentati ad energia rinnovabile** per ridurre il peso del costo energetico ed aumentare la sostenibilità dell'edificio stesso; valutazione da attuarsi preventivamente con un sistema di *energy management* che valuti le varie curve dei carichi e dei consumi;

→ Con l'utilizzo dei dati provenienti dai sensori QAI in situ, si potrebbe assistere ad un incremento dei costi per la tutela della salute delle persone che stazionano nell'edificio stesso. Questi costi provengono da una manutenzione più rigida ed attenta delle macchine, da un utilizzo maggiore delle macchine stesse, dal cambio più frequente di alcuni "pezzi" dell'impiantistica in campo. **In un'ottica del recupero dei costi stessi, si consiglia un utilizzo più efficiente delle tecnologie stesse**, integrando dati QAI con dati consumo, con l'obiettivo di raggiungere un maggior grado di efficienza energetica e manutenzione predittiva dell'impiantistica sia nel dettaglio che nella sua globalità.

[6] HVAC sta per *Heating, Ventilation and Air Conditioning*, ovvero riscaldamento, ventilazione e condizionamento.

Per raggiungere tutti questi obiettivi, si consiglia:

→ **L'utilizzo di protocolli di mercato per la comunicazione dei dati dalla sensoristica QAI alla piattaforma di raccolta dati ed analisi**. I protocolli potrebbero essere ad es. ModBus (nelle sue varie declinazioni) MQTT, IFTTT;

→ **L'utilizzo di *hardware-gateway* e *datalogger***, per la comunicazione (e lo "stoccaggio") del dato raccolto sul campo alla piattaforma *cloud*, che siano adeguati alle varie tipologie di edificio in cui sono installati i sensori QAI. La comunicazione potrà avvenire di volta in volta attraverso *Ethernet*, *Wi-Fi*, LoRa, ecc., scelte dipendenti anche dalla tipologia di edificio (metrature, muri). L'obiettivo rimane la non invasività, o il minor grado di invasività, e una soluzione che funzioni al meglio soprattutto nel caso di *retrofit*, andando a fare installazioni quasi sempre nel "già costruito" e molto spesso nel "molto datato";

→ **Una piattaforma, installabile sia in *cloud* che *on site*** (nei server delle scuole, negli edifici, ecc.) in grado di convogliare dati da diverse fonti (AIQ, energy, macchine, PLC, SCADA, building management system se necessario, file excel, meter, ecc.), e da vari protocolli di comunicazione (modbus, OCPP, Bacnet, ecc.) per permettere un'analisi del dato accurata, un utilizzo in ogni tipologia di situazione, una trasformazione del dato in informazione utile e più accurata possibile;

→ **Una dotazione tecnologica *hardware-software* adeguata ma non sovradimensionata**, in un'ottica di sostenibilità e comfort ma anche di sostenibilità in termini di tempi di ritorno dell'investimento della tecnologia stessa, da raggiungere tramite l'efficienza energetica (monitoraggio dati consumi, KPI, analisi, setting ed automazioni per efficienza energetica e miglioramento QAI).

Il tutto, si può misurare in KPI, tra i quali:

→ **Miglioramento della QAI dalle misurazioni iniziali a intervalli regolari stabiliti dai gestori**;

→ **Miglioramento dell'efficienza** energetica in termini di kWh risparmiati per tipologia consumo;

→ **Miglioramento della manutenzione predittiva** in termini di costi manutenzione risparmiati;

→ ***Payback* delle soluzioni adottate** in termini di totale risparmio in kWh in caso di utilizzo di soluzione di *energy management* insieme alla soluzione QAI.

5. Raccomandazioni dei Clust-ER Greentech e Build per il benessere *indoor* nelle scuole

Con il presente documento, i Clust-ER Greentech e Build intendono sensibilizzare i *Facility Manager*, i Responsabili HSE, i dirigenti scolastici e altre figure potenzialmente interessate sulla **rilevanza di una attenta gestione della qualità dell'aria indoor in ambito scolastico**, descrivendo le più recenti tecnologie e metodologie disponibili.

Si ritiene che i futuri interventi di edilizia scolastica non possano prescindere da una attenta valutazione degli aspetti di salubrità e comfort negli ambienti scolastici, che al giorno d'oggi possono essere garantiti dall'utilizzo integrato di sensoristica, impianti aeraulici e metodologie di gestione degli impianti. L'utilizzo di **valori prefissati di ricambi d'aria**, indipendentemente dalla valutazione in tempo reale dell'occupazione degli ambienti e della reale qualità dell'aria **non è efficiente e comporta spesso uno spreco energetico** per il trattamento e riscaldamento/raffreddamento dell'aria immessa.

All'interno dei Clust-ER Greentech e Build della Regione Emilia-Romagna, sono disponibili tutte le competenze, sia accademiche che imprenditoriali, necessarie ad affiancare le autorità preposte nella pianificazione delle azioni di riqualificazione dell'edilizia scolastica.

L'obiettivo condiviso dagli autori del presente documento è quello di proporre, sulla base delle proprie conoscenze e esperienza, le migliori pratiche e tecnologie disponibili per realizzare nei prossimi anni gli **ambienti scolastici del futuro, salubri, sostenibili ed energeticamente efficienti.**

CONTATTI

I soci del Clust-ER Greentech che hanno elaborato il Percorso Aria e quelli del Clust-ER Build mettono a disposizione le loro tecnologie e competenze. Ecco una panoramica dei contatti per favorire nuove iniziative e collaborazioni:

Befreest
info@befreest.com

Certimac
s.bandini@certimac.it

CIDEA - Università di Parma
agostino.gambarotta@unipr.it

Enea
antonella.malaguti@enea.it

CNR IMM
stefano.zampolli@cnr.it

Lab Service Analytica
bativ@labservice.it

Lav Srl
marcello.tognacci@lavrimini.com

Leap
senem.ozgen@polimi.it

Ocm Clima
simo.zalambani@ocmclima.com

Pollution
matteo.monticelli@polgroup.it

Proambiente
direzione@consorzioproambiente.it

Smart Domotics
raffaele.borgini@smartdomotics.it

Tcr Tecora
mariagrazia.perrone@tcrtecora.com

U-Series
info@u-series.com

CIRI EC - Università di Bologna
giovanni.semprini@unibo.it

Allegati

Allegato 1. Schema di flusso per la valutazione della QAI

Numerosi studi scientifici hanno verificato gli effetti positivi di una buona aria interna sulle prestazioni complessive durante attività antropiche come l'apprendimento e il lavoro quotidiano. Ogni scenario *indoor* è diverso (es. progettazione edilizia, arredi, categorie e abitudini delle persone, attività svolte). Molte sostanze, aventi effetti sulla salute umana differenti tra di loro, possono essere immesse nell'aria indoor dalle più diverse fonti di inquinamento. Non è possibile adottare una tecnica univoca o conforme a tutti i contesti per la valutazione dell'esposizione prolungata a inquinanti chimici, fisici, biologici noti ed emergenti; così come occorre valutare il contesto per comprendere il reale contributo dell'aria esterna. **Questo allegato descrive un approccio integrato alla valutazione dei sistemi di gestione della qualità dell'aria *indoor*.**

Figura 1.1: Viene qui rappresentato lo schema della metodologia descritta di seguito. Lo stesso schema e approccio tecnico alla base della norma `ISO 16000` relativa alla gestione della QAI.

📝 Inventario

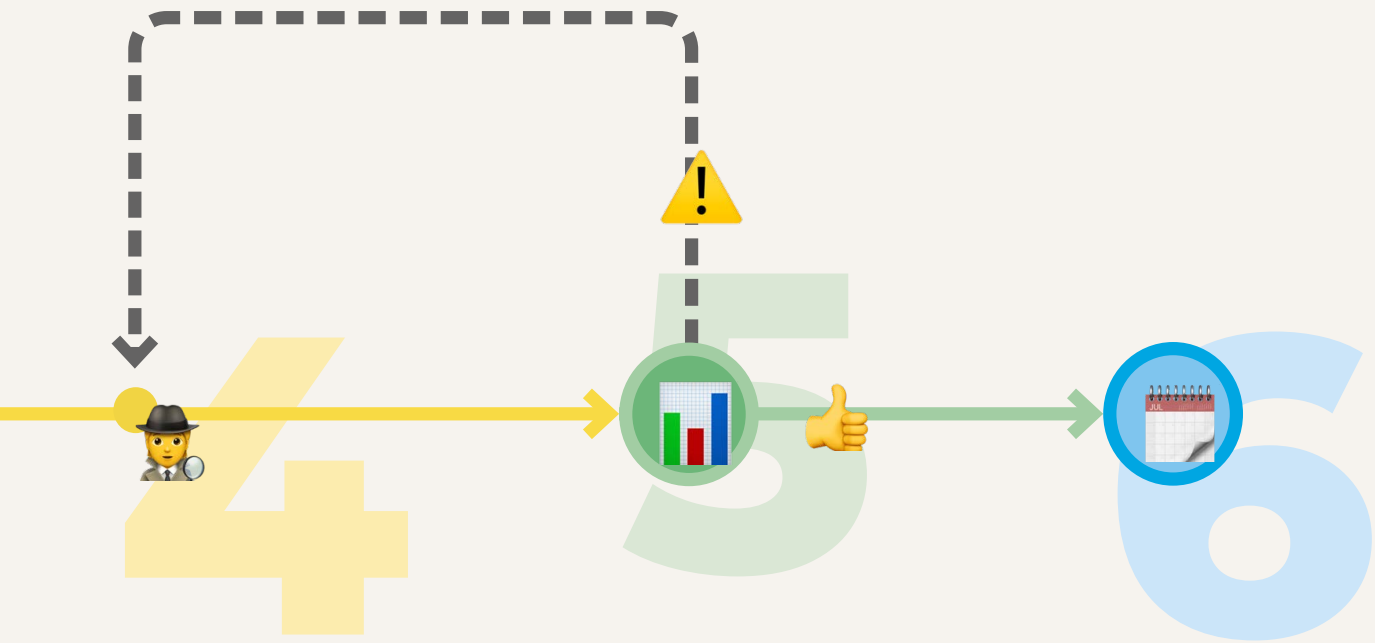
Elenco degli aspetti relativi alla qualità dell'aria

⚖️ Livello di rischio

Decidere la rilevanza degli aspetti relativi alla qualità dell'aria interna sulla base di una matrice di rischio di probabilità/impatto

🤔 Valutazione preliminare

Decidere gli ambienti, i parametri da monitorare, le revisioni documentali e le ispezioni visive o altre analisi da effettuarsi



🕵️ Valutazione analitica

Valutare lo stato degli aspetti rilevanti della qualità dell'aria interna. Azioni tipiche:
➔ Misurazione degli inquinanti
➔ Revisione dei documenti
➔ Ispezioni visive
➔ Analisi dei reclami e dei dati epidemiologici

📊 Risultato della valutazione

➔ Gli inquinanti sono al di sotto del livello di preoccupazione?
➔ I programmi di controllo sono implementati e registrati?
➔ Nessuna evidenza visiva di potenziali problemi?
➔ Nessun reclamo significativo?

🗓️ Revisioni periodiche

Stabilire un protocollo per la rivalutazione degli aspetti rilevanti della qualità dell'aria *indoor*.

Approccio integrato alla valutazione dei sistemi per la gestione della Qualità dell'Aria *Indoor*

La metodologia per identificare e valutare gli elementi caratterizzanti la QAI e garantire un miglioramento continuo dell'igiene dell'aria e del benessere delle persone viene qui sintetizzata prendendo ispirazione dalla parte 40 della **ISO 16000**, norma tecnica di riferimento. La gestione del processo per garantire la QAI si basa sui seguenti pilastri: (i) dati costruttivi e impiantistici dell'edificio; (ii) misurazioni in continuo della QAI tramite dispositivi riferibili; (iii) raccolta di percezioni individuali soggettive e reclami sulla QAI da parte dei residenti.

Di seguito viene riportato e descritto un elenco di ciascun punto da osservare e implementare.

1.a Identificazione del livello di rischio e valutazione degli aspetti relativi alla qualità dell'aria interna in un edificio

Tale azione potrebbe essere eseguita secondo le seguenti fasi:

→ **Redigere di un inventario** degli aspetti che possono avere un impatto sulla qualità dell'aria interna per ciascun edificio. Gli aspetti tipici sono:

- Ubicazione dell'edificio;
- Usi, attività e *layout* edilizio;
- Materiali da costruzione; arredamento, beni di consumo e apparati elettrici;
- Installazioni edili;
- Parcheggi;
- Locali per usi speciali (deposito, meccanica, aree ristoro, mense, ecc.);
- Manutenzione degli edifici, compresi i prodotti per la pulizia e la manutenzione;
- Eventuali caratteristiche della ristrutturazione edilizia.

→ **Determinare il livello di rischio** valutando se le caratteristiche specifiche di ciascun edificio hanno un'influenza rilevante sulla qualità dell'aria interna;

→ **Effettuare una valutazione** di tutta la qualità dell'aria interna mediante i passaggi seguenti.

1.b Misurazione degli inquinanti

I parametri principali da considerare sono i seguenti:

→ Anidride carbonica (CO_2)
→ Composti Organici Volatili (COV)
→ Formaldeide (FA)
→ Materiale Particellare (PM1, PM2.5, PM10)
→ Microrganismi aerodispersi (muffe e batteri)
→ Odori
→ Radon

Nell'ambito dell'approccio integrato alla valutazione dei sistemi di gestione della QAI, è compito dell'esperto discriminare quali di questi parametri principali prendere in esame, in funzione delle caratteristiche dell'ambiente *indoor*. Due precisazioni al riguardo:

→ **La comparsa di muffe** è solitamente associata alla presenza di funghi filamentosi e lieviti. Spesso sono presenti anche batteri. Nel caso delle misurazioni dell'aria, di solito viene registrata principalmente la concentrazione di muffe e batteri[7].

→ **I parametri fisici "temperatura dell'aria ambiente" e "umidità relativa"** devono essere registrati separatamente nella rappresentazione dei risultati della misurazione, poiché influenzano le concentrazioni di inquinanti nell'aria ambiente e sono spesso associati dagli utenti a una qualità dell'aria interna inadeguata. Volendo implementare un approccio che risulti pratico e di facile attuazione, è oggi possibile implementare (anche temporaneamente) reti di monitoraggio della qualità dell'aria indoor riferibili (vedasi le tecniche di misura e le recenti evoluzioni dei tavoli tecnici CEN-ISO) che effettuano rilevazioni in continuo.

In aggiunta e a complemento di quanto appena riportato, si suggerisce di:

→ **Attuare indagini o campionamenti pianificati** negli ambienti indoor più rappresentativi, soprattutto qualora si stia affrontando la campagna di monitoraggio in uno stabile su più livelli o con attività distinte.

→ **Documentare** il metodo di misurazione, la metodologia usata, i risultati della misurazione e le condizioni quadro dell'indagine.

1.c Raccogliere le percezioni e i reclami delle persone sulla QAI

La raccolta periodica delle percezioni dello stato di comfort e benessere delle persone che vivono o frequentano i locali indoor sotto indagine risulta essenziale. In particolar modo nei contesti in cui si vogliano coinvolgere in modo proattivo le persone e/o implementare un sistema che incentivi l'adozione di cambiamenti comportamentali. Tali informazioni, se raccolte, dovranno essere analizzate sistematicamente e confrontate con i dati relativi all'edificio, ai rischi legati alla QAI e alla qualità dell'aria monitorata per verificarne l'affidabilità e individuare eventuali azioni correttive.

1.d Revisione periodica e gestione dati

Revisione periodica dei parametri di riferimento sulla base di un **Piano di manutenzione programmato**, della percezione delle persone e dei cambiamenti nelle attività e/o nei comportamenti.

[7] Per approfondimento su altre macro-categorie consultare le disposizioni INAIL https://www.inail.it/cs/Satellite?c=Page&cid=2443085354483&d=68&pagename=Internet%2FPage%2FpaginaFoglia%2Flayout

Allegato 2. Tabelle dei limiti di emissione dei COV definiti dal decreto CAM

Sostanze	Limite di emissione (µg/m³) a 28 gg
Benzene Tricloroetilene (trielina) di-2-etilesilftalato (DEHP) Dibutilftalato (DBP)	1 per ogni sostanza
COV totali*	1500
Formaldeide	<60
Acetaldeide	<300
Toluene	<450
Tetracloroetilene	<350
Xilene	<300
1,2,4-Trimetilbenzen	<1500
1,4-diclorobenzene	<90
Etilbenzene	<1000
2-Butossietanolo	<1500
Stirene	<350

Tabella 2.1: Limitidiemissione(µg/m³)a28ggprescrittidaldecretoCAM e determinati in accordo con le norme UNI- EN ISO 16000 o UNI- EN ISO 16516

Sostanze	Classe C	Classe B	Classe A	Classe A+
Formaldeide	>120	<120	<60	<10
Acetaldeide	>400	<400	<300	<200
Toluene	>600	<600	<450	<300
Tetracloroetilene	>500	<500	<350	<250
Xilene	>400	<400	<300	<200
1,2,4 -Trimetilbenzene	>2000	<2000	<1500	<1000
1,4 - Diclorobenzene	>120	<120	<90	<60
Etilbenzene	>1500	<1500	<1000	<750
2- Butossietanolo	>2000	<2000	<1500	<1000
Stirene	>500	<500	<350	<250
TCOV	>2000	<2000	<1500	<1000

Tabella 2.2: Limiti di emissione (µg/m³) a 28 gg prescritti dal decreto francese e determinati in accordo con le norme ISO 16000

Allegato 3. Parametri da considerare per la scelta del metodo strumentale utilizzato per la determinazione di sostanze chimiche aerodisperse

Concetto di calibrazione e ricalibrazione. Per definizione, la calibrazione si riferisce al processo di correzione degli errori sistematici nelle letture dei sensori, spesso confrontando una misura nota di un primo dispositivo (II/III livello) con una misura sconosciuta di un secondo dispositivo per tarare i parametri che regolano questo secondo dispositivo, al fine di fornire una misura precisa. Il termine è stato spesso utilizzato anche per riferirsi al processo di regolazione delle letture grezze del sensore per ottenere valori corretti, mappandoli in unità standardizzate (per es. il sensore può fornire una tensione elettrica variabile in base alla concentrazione di uno specifico inquinante nell'ambiente circostante, in questo caso il segnale in Volt è convertito in concentrazione di inquinante attraverso l'applicazione di algoritmi o curve di taratura). **La calibrazione** spesso si basa sulla fornitura di uno stimolo specifico con un risultato noto, creando così una mappatura diretta (curve di taratura) tra le uscite del sensore e i valori attesi. Di conseguenza, tale calibrazione per un sensore è spesso soggetta a intervalli specifici e restrizioni delle condizioni operative, che sono riportati nelle specifiche del produttore del sensore. Questo tipo di calibrazione può essere eseguita in fabbrica con ambiente di prova controllato, durante la fase di produzione, manualmente in campo, o entrambi. **La ricalibrazione invece** è solitamente necessaria per garantire il corretto funzionamento di un dispositivo di misurazione, poiché l'invecchiamento e altri fattori influiscono nel tempo sui sensori e su altro hardware di misurazione. Si presume che i sensori rimangono attivi per lunghi periodi di tempo dopo il dispiegamento; pertanto, dovrebbero essere controllati regolarmente rispetto a strumenti standard, per garantire la qualità delle misurazioni e per consentire la ricalibrazione periodica necessaria a causa della perdita di precisione causata dalle condizioni ambientali o da difetti interni. **La sensibilità del sensore** potrebbe cambiare quando il dispositivo è soggetto a grandi variazioni di temperatura o umidità. Tuttavia, i sensori *low cost* potrebbero fornire dati più affidabili *indoor*, dove la temperatura e l'umidità relativa variano meno rispetto all'esterno e dove le sorgenti interne possono eventualmente elevare le concentrazioni delle specie monitorate al di sopra dei livelli esterni.

→ **Selettività del metodo**:
La selettività si riferisce alla capacità di un metodo analitico di determinare univocamente l'analita di interesse. Una misurazione è in grado di essere influenzata da diverse variabili, comprese le altre specie chimiche che costituiscono la matrice. Una elevata selettività garantisce quindi che la misura sia effettivamente riferibile solamente all'analita oggetto dell'analisi. Le interferenze possono portare a sottostimare o sovrastimare il risultato finale, pregiudicandone l'accuratezza. Per ovviare a ciò, quando possibile e quando non si hanno a disposizione altri metodi, si eseguono procedure atte ad eliminare tali interferenze prima di effettuare la misurazione riguardante l'analita.
È ovvio quindi che, oltre all'affidabilità del risultato, un'elevata selettività garantisce anche vantaggi quali ridotti tempi di analisi e costi minori, non essendo richiesti pretrattamenti supplementari. Un modo di valutare la selettività consiste nel verificare come varia la misura aggiungendo specie potenzialmente presenti nei campioni, allo stesso modo si possono variare le condizioni operative (ad esempio in cromatografia si può valutare l'effetto della variazione di fase stazionaria, dell'eluente o della temperatura a cui è effettuata la separazione).

→ **Campo dei valori ottenibili**:
definire un intervallo di concentrazioni (minimo - massimo) all'interno del quale verificare le prestazioni strumentali e del metodo.

→ **Limite di rilevazione (LOD)**:
Definisce la più piccola quantità di analita che può essere rivelata, ma non esattamente quantificata. Il limite di rivelabilità è la minima concentrazione di analita che produce

un segnale diverso da quello del bianco, ovvero la concentrazione corrispondente al minimo segnale significativo. Viene indicato comunemente con le sigle inglesi DL e LOD (rispettivamente *Detection Limit* e *Limit Of Detection*).

→ **Limite di quantificazione (LOQ)**: Esprime la più piccola quantità di analita che può essere correttamente quantificata con adeguata precisione e accuratezza. È proporzionale al limite di rivelazione (in molti casi si considera 3 volte LOD). Tipicamente il valore del LOQ viene valutato come 10 volte la deviazione standard della misura effettuata sul bianco, ma esistono altri metodi per valutarlo.

→ **Linearità**: La linearità di risposta è la capacità di un metodo di determinare in modo direttamente proporzionale la presenza di un analita, in relazione alla sua quantità nel campione. Per fare ciò, si verifica a diversi intervalli di concentrazione comprendenti il valore teorico (nel caso di determinazioni di contenuti quantitativi) o la quantità massima accettabile (nel caso di impurezze), che i valori di risposta ottenuti per l'analita non siano eccessivamente lontani dalla retta più opportuna tracciata utilizzando tutti i livelli di concentrazione. Tale intervallo si definisce "intervallo di linearità" e solo all'interno dei valori minimo e massimo di concentrazione è garantita la linearità della risposta.

→ **Selettività**: La selettività è la capacità di un metodo di determinare l'analita univocamente, senza subire le interferenze di altri componenti presenti nel campione, siano essi eccipienti facenti parte della matrice, prodotti secondari di sintesi o di degradazione, etc, o di altri composti aventi caratteristiche chimiche analoghe.

→ **Ripetibilità**: stima della variabilità dei risultati ottenuti dallo stesso operatore utilizzando lo stesso strumento analizzando lo stesso campione in un periodo di tempo il più possibile ristretto.

→ **Precisione intermedia (Riproducibilità)**: stima della variabilità dei risultati ottenuti utilizzando lo stesso metodo e lo stesso laboratorio ma operatori e/o strumenti e/o condizioni ambientali diverse ed esecuzione in intervallo di tempo esteso.

→ **Esattezza**: si riferisce al metodo: differenza tra risultato e valore vero solo a causa dell'errore sistematico (*Bias*).

→ **Robustezza:** La robustezza di una procedura analitica è la sua capacità di non essere influenzata da piccole, ma deliberate, variazioni nei parametri del metodo, e fornisce un'indicazione della sua affidabilità durante l'impiego normale. La valutazione della robustezza dovrebbe essere considerata in fase di sviluppo e dipende dal tipo di metodo in studio. Dovrebbe dimostrare l'affidabilità dei risultati rispetto a deliberate variazioni dei parametri del metodo. Se i risultati sono suscettibili a variazioni delle condizioni analitiche, queste dovranno essere controllate in modo idoneo.

→ **Calibrazione**: La calibrazione consiste nella misura del segnale strumentale di soluzioni a titolo noto (o di soluzioni a cui sono state aggiunte quantità note) di analita. Di solito è sufficiente misurare il segnale strumentale in corrispondenza a 4-5 valori di concentrazione. A partire da questi punti sperimentali si ricava (di norma col metodo dei minimi quadrati) l'espressione della funzione algebrica che meglio correla segnale e concentrazione.

→ **Incertezza di misura**:
La stima dell'incertezza di misura è una delle operazioni più importanti nell'esecuzione di una misurazione, in quanto l'incertezza, che deve sempre essere comunicata, esprime l'indeterminazione nella conoscenza del parametro misurato. Una stima per difetto dell'incertezza porta ad assegnare ad una misura una significatività maggiore di quella effettiva, con conseguenti problemi di natura tecnica e/o legale.
D'altra parte, una stima per eccesso sminuisce la qualità della misura, ottenuta grazie all'impiego di apparecchiature costose e metodi complessi. La determinazione dell'incertezza di misura è un processo complesso che tiene conto del contributo dei vari errori di tipo sistematico e di tipo casuale associati alla misura.

Allegato 4. Tabelle delle portate dei ricambi di aria per gli impianti di ventilazione meccanica

La norma **UNI 10339 del 1995** per edifici adibiti ad attività scolastiche ed assimilabili prevede una immissione di aria esterna pari o maggiore dei valori minimi riportati nella tabella 4.1. Le successive tabelle 4.2 e 4.3 riportano i valori delle portate specifiche di aria, valide in generale per gli edifici non residenziali.

Locale	Portate di aria esterna **per persona** l/s (m³/h)	Portate di estrazione (vol/s)
Asili nido e scuole materne	4 (14,4)	
Aule scuole elementari	5 (18,0)	
Aule scuole medie inferiori	6 (21,6)	
Aule scuole medie superiori	7 (25,2)	
Aule universitarie	7 (25,2)	
Biblioteche, Sale lettura, Sale insegnanti	6 (21,6)	
Aule Musica, Aule lingue, Laboratori	7 (25,2)	
Transiti, Corridoi, Servizi		8

Tabella 4.1: Portate di rinnovo di aria esterna per edifici scolastici secondo **UNI 10339 (1995)**

Categoria edificio	Portata di aria **per persona qp** (l/s persona)	
	Non adattata	Adattata
I	10	3,5
II	7 *	2,5
III	4	1,5
IV	2,5	1

Tabella 4.2: Portate di rinnovo di aria esterna per persona secondo **EN 16798-1**

Categoria edificio	Portate di aria **per superficie qB** (l/s m²)		
	VLPB	**LPB**	**NLPB**
I	0,5	1	2,0
II	0,35 **	0,7 ***	1,4
III	0,2	0,4	0,8
IV	0,15	0,3	0,6

Tabella 4.3: Portate di rinnovo di aria esterna per superficie unitaria secondo **EN 16798-1**

FOCUS

UNI EN 16798-1

La norma fornisce valori di progetto della portata di ventilazione basata sulla qualità dell'aria percepita. Il valore della portata di progetto si ottiene sommando una portata d'aria (qp) necessaria per diluire/rimuovere i bioeffluenti dovuti agli occupanti e una portata d'aria (qB) necessaria per diluire/rimuovere gli inquinanti generati dall'edificio e dai sistemi ivi presenti. La somma di tali valori deve essere moltiplicata per l'efficienza di ventilazione nel caso in cui la distribuzione dell'aria si discosti dalla completa miscelazione.

GLOSSARIO

I valori delle portate qp sono riportati per 4 diverse categorie di "qualità" dell'edificio, come definite dalla stessa norma. **I valori delle portate qB** sono invece definiti in funzione dei livelli di inquinanti prodotti dai materiali secondo le seguenti definizioni:

VLPB
(Very Low Polluting Buildings)

LPB
(Low Polluting Buildings)

NLPB
(Non Low Polluting Buildings)

* Da utilizzare secondo decreto **CAM**
** Da utilizzare secondo decreto **CAM** per nuova costruzione demolizione e ricostruzione, ampliamento e sopraelevazione
*** Da utilizzare secondo decreto **CAM** per ristrutturazioni importanti di I livello

Allegato 5. Tabelle di classificazione dell'aria esterna ed interna secondo la norma UNI- EN 16798

Il sistema di filtrazione idoneo alla QAI tiene conto del **tipo di inquinante** da trattare, della **qualità dell'aria esterna** e della **destinazione d'uso dell'edificio**.

L'aria esterna viene classificata dalla norma **UNI- EN 16798-3** in base a 3 categorie (👉Tabella 5.1). Mentre gli ambienti interni sono classificati in base alla loro destinazione d'uso (👉Tabella 5.2).

🔍 GLOSSARIO
ODA
(*Outdoor Air*, categoria che indica la qualità dell'aria esterna)

GLOSSARIO
SUP
(*Supply*, sistema di classificazione dell'aria di mandata immessa in base alla concentrazione di inquinanti)

Inquinamento	Categoria	Ambiente tipico	Concentrazione di particolato e/o inquinanti gassosi	µg/m³ (media annua)	
Livello basso	ODA 1	Aree rurali	Bassa	PM2,5 PM10	< 10 µg/m³ < 20 µg/m³
	ODA 2	Piccole città	Alta	PM2,5 PM10	< 15 µg/m³ < 30 µg/m³
Livello alto	ODA 3	Centri urbani inquinati	Altissima	PM2,5 PM10	< 15 µg/m³ > 30 µg/m³

Tabella 5.1: Valori indicativi della qualità dell'aria secondo la norma **UNI- EN 16798**

Inquinamento	Categoria	Ambiente tipico	Concentrazione di particolato e/o inquinanti gassosi	µg/m³ (media annua)	
Livello basso	SUP 1	Ospedali, industrie farmaceutiche	Molto bassa	PM2,5 PM10	< 2,5 µg/m³ < 5 µg/m³
	SUP 2	Locali con presenza di persone, uffici, hotel, edifici residenziali, scuole, teatri, cinema	Bassa	PM2,5 PM10	< 5 µg/m³ < 10 µg/m³
	SUP 3	Locali con presenza temporanea di persone, negozi, ristoranti	Media	PM2,5 PM10	< 7,5 µg/m³ < 15 µg/m³
	SUP 4	Locali con permanenza breve o di transito, bagni, scale, ripostigli	Alta	PM2,5 PM10	< 10 µg/m³ < 20 µg/m³
Livello alto	SUP 5	Locali non occupati, locali spazzatura, garage, industria pesante	Molto alta	PM2,5 PM10	< 15 µg/m³ < 30 µg/m³

Tabella 5.2: Valori indicativi della qualità dell'aria immessa secondo la norma **UNI- EN 16798-3**

☝ Le scuole ricadono nella casistica SUP 2, per cui la scelta dei filtri da inserire negli impianti aeraulici per adeguare la qualità dell'aria interna alle aule dipende dalla qualità dell'aria esterna alla scuola (ODA).

Affinché si possa raggiungere un livello qualitativo di aria interno alle aule (conforme a **SUP 2**) occorre scegliere adeguati filtri da inserire nell'impianto aeraulico con prestazioni specifiche, come da tabella successiva.

Aria esterna (ODA) / Aria immissione (SUP)	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5
ODA 1	ePM10 50% + ePM1 60%	ePM1 50%	ePM10 50%	ePM10 50%	-
ODA 2	ePM2,5 50% + ePM1 60%	ePM10 50% + ePM1 60%	ePM1 50%	ePM2,5 50%	ePM10 50%
ODA 3	ePM2,5 50% + ePM1 80%	ePM2,5 50% + ePM1 60%	ePM2,5 80%	ePM10 90%	ePM10 80%

Tabella 5.3: Selezionedeifiltriinbaseall'ariaesterna(ODA)eallaqualitàdell'ariainternaindicatanellanorma**UNI-16798-3**perladestinazioned'uso dei locali da trattare (SUP)

In copertina: © Maroke / Canva Pro

CLUST-ER GREENTECH
ENERGIA E SOSTENIBILITÀ

Via P. Gobetti, 101
40129 Bologna
CF 91399930378
info@greentech.clust-er.it

CLUST-ER BUILD
EDILIZIA E COSTRUZIONI

Via P. Gobetti, 101
40129 Bologna
CF 91399960375
silvia.rossi@build.clust-er.it

Ottobre 2022
Documento prodotto dal Clust-ER Greentech con la collaborazione del Clust-ER Build

Autori:
Simone Bandini / **Certimac**
Ivano Battaglia / **Lab Service Analytica**
Raffaele Borgini / **Smart Domotics**
Fabio Cerino / **befreest**
Gabriele Cotza / **U-Series**
Enrico Cozzani / **Proambiente**
Giuseppe Cremona / **ENEA**
Agostino Gambarotta / **CIDEA - Università di Parma**
Mariacristina Gugliandolo / **TCRTECORA**
Antonella Malaguti / **ENEA**
Matteo Monticelli / **Pollution**
Senem Ozgen / **LEAP Piacenza**
Giovanni Semprini / **CIRI EC - Università di Bologna**
Marcello Tognacci / **LAV**
Simonetta Zalambani / **OCM Clima**
Stefano Zampolli / **CNR (IMM)**