



Rapporto tecnico
“Ventilazione Meccanica Controllata
negli edifici scolastici: criteri
progettuali, installazione, qualità
degli ambienti interni, test in opera
e valutazioni economiche”

Coordinamento editoriale

Assessorato alle Infrastrutture e Lavori Pubblici
Regione Marche Dipartimento Infrastrutture, territorio e protezione civile
Settore Edilizia Sanitaria, Ospedaliera e Scolastica

Progetto grafico, editing e impaginazione

MAP Communication

Tutti i diritti su testi e grafici presentati sono e restano degli autori, salvo le immagini provenienti da altre fonti citate.

Ogni riproduzione, anche parziale, non preventivamente autorizzata costituisce violazione del diritto d'autore. Diritti di traduzione, riproduzione e adattamento totale o parziale e con qualsiasi mezzo, riservati per tutti i paesi.

Finito di stampare nel mese di aprile 2026





PREFAZIONE

A cura di Francesco Baldelli, Assessore alle Infrastrutture e ai Lavori Pubblici della Regione Marche



La Regione Marche ha creduto fin dal mese di marzo 2021, nel pieno della pandemia da Covid 19, nell'efficacia della Ventilazione Meccanica Controllata, tecnologia in grado di garantire elevati livelli di salubrità dell'aria negli ambienti indoor.

La drammatica esperienza del Covid ha messo in evidenza la necessità di adottare interventi strutturali sulla qualità dell'aria proprio a partire dagli edifici pubblici, come scuole e ospedali, molti dei quali costruiti più di 70 anni fa e in alcuni casi mostrano tutti i segni del tempo.

Abbiamo subito attivato risorse per l'istallazione di impianti di VMC destinati all'edilizia scolastica, coinvolgendo le amministrazioni locali e il mondo della scuola con un'azione di rottura rispetto agli interventi passati.

L'errore nella gestione della pandemia è stato quello di considerare la trasmissione del virus esclusivamente tramite droplet, puntando solo su mascherine, distanziamento e lavaggio delle mani, trascurando la trasmissione attraverso il meccanismo dell'aerosol, inalazione di piccole goccioline invisibili che fluttuano negli ambienti chiusi.

Se l'emergenza fosse stata affrontata con la tecnologia VMC, insieme ad altre doverose misure precauzionali, ci saremmo risparmiati lo stop dell'attività scolastica e l'azzeramento della vita sociale dei ragazzi, fattori che hanno influito sull'aumento delle fragilità tra la "generazione Covid". A questo si sono aggiunte altre drastiche decisioni, come quelle del blocco di qualsiasi altra attività relazionale.

La Regione Marche ha scelto di passare subito dalla logica di interventi spot a soluzioni tecnologiche finalizzate a migliorare la qualità della vita delle persone e le performance di chi trascorre molte ore in ambienti affollati e con scarso ricambio di aria. Non trascurabile, inoltre, il fatto che il contenimento della diffusione del virus grazie all'adozione della tecnologia VMC, ha un impatto positivo sull'abbassamento dei livelli di contagio e ospedalizzazione, con ricadute altrettanto positive in termini di abbattimento dei costi che gravano sul sistema della sanità pubblica. È nato così il primo intervento strutturale in Italia per migliorare la qualità dell'aria nelle scuole, con l'obiettivo di contenere la diffusione del Covid e, in prospettiva, quella di altre patologie trasmissibili per via aerea.

Grazie a questi investimenti regionali, Comuni e Province, proprietari degli edifici scolastici, hanno ricevuto 10 milioni di euro per installare 2500 impianti di VMC in altrettante aule frequentate da oltre 30mila ragazzi. È stato un investimento per fasi, che ci ha consentito di verificare passo dopo passo i risultati, grazie all'ausilio di dati scientifici, come quelli della Fondazione David Hume, presieduta dal professor Luca Ricolfi, che ha dimostrato come gli impianti VMC, se correttamente dimensionati, abbattano più dell'80% il rischio di infezione da Covid.

L'Università Politecnica delle Marche ha poi effettuato un'indagine socioeconomica finalizzata a valutare i vantaggi dell'adozione di tale tecnologia in termini di costi-benefici dell'investimento.

Con la partecipazione al progetto necessARIA, abbiamo avviato la fase di divulgazione dei risultati, al fine di verificare l'efficacia della VMC per abbattere i livelli di CO₂, aspetto fondamentale per le ripercussioni che tale inquinamento può avere sul livello di attenzione e di apprendimento degli studenti. La pubblicazione fornisce criteri chiari, verificabili e replicabili per la progettazione, l'installazione, la gestione e la valutazione dei sistemi di VMC negli edifici scolastici, e rappresenta la méta di un percorso avviato in piena emergenza Covid, con l'obiettivo di aprire un dibattito a livello nazionale sul tema della qualità dell'aria negli ambienti pubblici, mettere al centro la cosiddetta "architettura del benessere" e la necessità di ammodernare il patrimonio edilizio a beneficio di chi vi lavora e dei cittadini che usufruiscono dei relativi servizi.

Quella che all'inizio si prospettava come un'azione pionieristica di una singola regione, oggi, grazie ai risultati scientifici, all'esperienza maturata sul campo, ai contributi degli esperti del settore e alle competenze messe in campo dal progetto necessARIA, è divenuta una grande opportunità per diffondere buone politiche e buone pratiche.



Verso scuole più salubri e sostenibili: il contributo del progetto necessARIA per la qualità dell'aria nelle aule

Dott. Luca Verdi, Coordinatore progetto necessARIA e Direttore Laboratorio Analisi Aria e Radioprotezione della Provincia autonoma di Bolzano

Il progetto necessARIA nasce dall'esigenza e della volontà di affrontare in modo strutturale il tema della **qualità dell'aria nelle scuole**. La Provincia autonoma di Bolzano si è proposta per guidare questa iniziativa nazionale nella convinzione che la qualità dell'ambiente interno – e in particolare dell'aria che studentesse, studenti e personale scolastico respirano per molte ore al giorno – non sia un dettaglio tecnico, ma una componente essenziale del diritto alla salute, del diritto all'istruzione e della qualità del lavoro educativo. Il progetto, finanziato dal Ministero della Salute nell'ambito del Piano Nazionale Complementare “Salute, Ambiente, Biodiversità, Clima”, ha offerto l'opportunità di coinvolgere competenze sanitarie, tecniche, pedagogiche e gestionali per definire criteri condivisi, verificabili e replicabili per la ventilazione meccanica controllata negli edifici scolastici.

Nel corso di questi anni le attività di necessARIA hanno seguito alcune direttrici fondamentali.

Da un lato abbiamo condotto un lavoro di analisi e di monitoraggio nelle scuole, in diverse regioni italiane e in contesti climatici differenti, per misurare lo stato della qualità dell'aria nelle aule, con e senza impianti di ventilazione meccanica controllata (VMC), e per valutare gli effetti reali delle diverse soluzioni tecniche.

In parallelo abbiamo sviluppato una riflessione approfondita sulle tipologie di edifici scolastici esistenti, sulle caratteristiche delle aule, sui vincoli normativi e sugli aspetti acustici ed energetici, con l'obiettivo di definire criteri di progettazione che fossero al tempo stesso ambiziosi e realistici.

Un elemento qualificante di necessARIA è stato inoltre il lavoro sperimentale svolto nel cosiddetto “Laboratorio dell'aria”, dove, in condizioni controllate, abbiamo verificato sul campo l'efficacia dell'aerazione, della ventilazione meccanica e di alcune tecnologie aggiuntive, mettendo alla prova le ipotesi teoriche con misurazioni in condizioni controllate e documentate.

Un altro aspetto strategico ha riguardato la dimensione operativa e amministrativa: a partire dalle esperienze concrete di installazione nelle scuole coinvolte, abbiamo elaborato un modello di bando di gara che aiuta gli enti proprietari a orientarsi tra specifiche tecniche, requisiti normativi, criteri di selezione e aspetti gestionali. Allo stesso tempo, abbiamo prodotto documenti tecnici per la progettazione acustica degli impianti, per la regolazione e il monitoraggio basati sulla CO₂, per la manutenzione programmata e per il corretto coinvolgimento delle comunità scolastiche nelle fasi di cantiere e di esercizio.

Le esperienze raccolte dal team necessARIA evidenziano che la VMC, se correttamente progettata, installata e gestita, è in grado di garantire livelli di qualità dell'aria interna che con la sola apertura delle finestre, nelle condizioni reali di esercizio, risultano difficilmente raggiungibili in modo continuativo, soprattutto in inverno e in contesti urbani complessi. Si conferma l'importanza della progettazione e della corretta gestione degli spazi, ma anche della manutenzione e del costante monitoraggio in caso di VMC. Il progetto ha anche mostrato che alcuni dispositivi proposti come alternative “facili” alla ventilazione – ad esempio purificatori o tecnologie passive – non possono sostituire un sistema di ricambio dell'aria ai fini della salubrità dell'aria indoor.

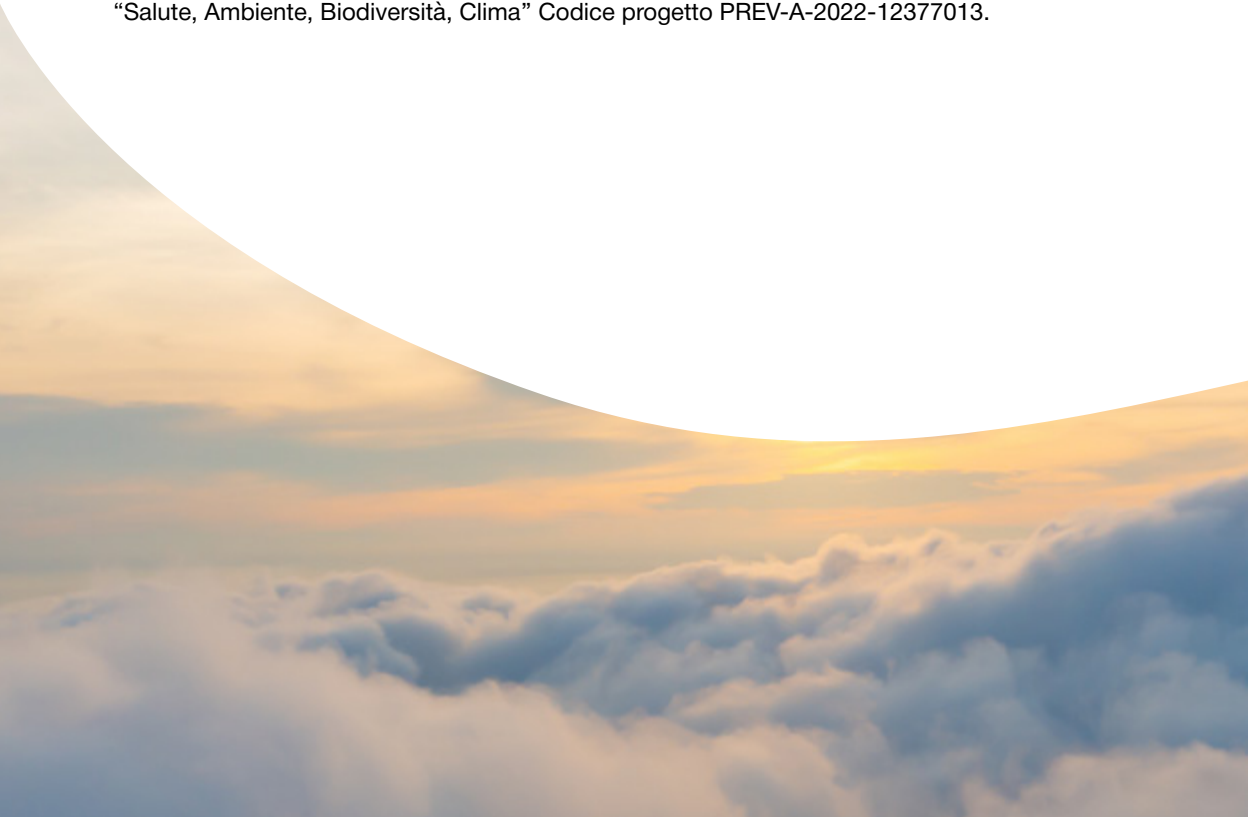
Seguendo il mandato del Ministero della Salute, necessARIA rappresenta quindi non solo un insieme di dati e di casi studio, ma un passo verso politiche più consapevoli e integrate per migliorare la qualità dell'aria nelle scuole e tutelare la salute umana. Le indicazioni tecniche e i modelli operativi raccolti in questo rapporto fungono da riferimento concreto per aggiornare le pratiche progettuali e gestionali, e per indirizzare scelte e politiche. Al tempo stesso, il lavoro svolto conferma che il miglioramento della qualità dell'aria non è un tema di nicchia, ma un elemento chiave di una più ampia strategia di qualificazione dell'edilizia scolastica, comprendente salute, benessere, apprendimento e sostenibilità ambientale.

SOMMARIO

Introduzione	10
1. Qualità degli ambienti interni nelle scuole	12
2. Sistemi di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC) per le scuole	16
2.1 Modalità di installazione negli edifici esistenti	
3 Caratterizzazione delle classi scolastiche, tipologie più frequenti	18
3.1 Analisi	
3.2 Requisiti normativi degli spazi scolastici e affollamento delle aule 15	
4. Attività svolte nelle scuole della Regione Marche	24
5. Qualità acustica degli ambienti interni scolastici. Rumore di impianto VMC: normativa, misura e soluzioni progettuali	34
5.1 Quadro normativo di riferimento	
5.1.1 Criteri Ambientali Minimi (CAM) — D.M. 23 giugno 2022	
5.1.2 Strumento normativo per la valutazione acustica: UNI 11532-2	
5.2. Indicatori acustici rilevanti per le aule scolastiche	
5.2.1 Tempo di riverberazione ottimale (Tott)	
5.2.2 Intelligibilità del parlato: STI e C50	
5.2.3 Rumore degli impianti a funzionamento continuo: Lic,int	
5.3 Il rumore di impianto VMC: criticità e monitoraggio	
5.3.1 Natura del problema	
5.3.2 Evidenza dai monitoraggi del progetto necessARIA: aule senza VMC	
5.4 Protocollo di misura in opera	
5.4.1 Strumentazione	
5.4.2 Procedura di misura secondo UNI 11532-2	
5.4.3 Valutazione psicoacustica e questionario soggettivo	
Analisi psicoacustica strumentale (Sottek Hearing Model ECMA 418-2)	
Questionario soggettivo IEQ (UNI 10551 — ISO 12913)	
5.5 Configurazioni impiantistiche	
5.5.1 Architettura della soluzione Categoria I (vedi capitolo “Rating per le diverse soluzioni”)	
5.6. Casi studio	
5.6.1 Aula Falcone-Borsellino, Abruzzo, NERETO (TE)	
5.6.2 Aula Scuola Primaria Quartiere Le Grazie, RECANATI (MC)	
5.6.3 Aula 5 Scuola Primaria M.L. King, BOLZANO (BZ)	
5.6.4 Aula 1c Scuola Manzoni, BOLZANO (BZ)	
6. Le installazioni e i monitoraggi delle scuole del progetto necessARIA	50
6.1 Il modello di bando di gara	
6.2 Le 35 installazioni del progetto necessARIA	
6.3 I risultati dei monitoraggi nelle scuole del progetto necessARIA	
6.3.1. Focus monitoraggio delle scuole della Provincia autonoma di Bolzano	
6.3.2 Focus monitoraggio delle scuole di Bari	
6.3.3 Focus monitoraggio delle scuole della Regione Abruzzo	

6.4 Il Laboratorio dell'aria	
6.4.1 Obiettivi specifici	
6.4.2 Metodi/Condizioni di prova	
6.4.3 Caratteristiche camera test (laboratorio dell'aria)	
6.4.4 Test con i traccianti	
6.4.5 Verifica delle prestazioni della VMC	
6.4.6 Prove di aerazione	
6.4.7 Prove con ventilazione meccanica controllata (VMC)	
6.4.8 Comportamento inquinanti in camera test	
6.4.9 Prove con pellicole trattate all'ossido di titanio	
6.4.10 Conclusioni	
7. Rating per le diverse soluzioni per la qualità dell'aria nelle scuole	84
8. Analisi socio-economica del progetto di installazione di impianti di ventilazione controllata nelle scuole marchigiane: l'approccio metodologico	86
8.1 Introduzione	
8.2 La qualità dell'aria indoor	
8.3 La qualità dell'aria negli edifici scolastici e le sue implicazioni	
8.4 Metodologia e protocollo d'analisi	
8.4.1 L'analisi statistica	
8.4.2 L'analisi economica	
Allegato 1: Relazione per caratterizzazione della scuola/classe	96
Riferimenti, definizioni e bibliografia	100

Il progetto è finanziato dal Ministero della salute nell'ambito del Piano Nazionale Complementare "Salute, Ambiente, Biodiversità, Clima" Codice progetto PREV-A-2022-12377013.



Introduzione

La **qualità dell'aria** interna negli ambienti scolastici (dal nido, all'infanzia, alla scuola primaria e secondaria di I grado e di II grado), ovvero quelli che ospitano un importante compito educativo, sia nel settore pubblico come in quello privato, è tema di primaria importanza, sia sotto il profilo della salute che sotto quello dell'apprendimento. Gli **edifici scolastici** rappresentano una categoria di ambienti in cui si svolgono una molteplicità e una eterogeneità di attività e funzioni didattico-educative, in rapido progresso, che si differenziano dalle altre tipologie di edifici sociali, in quanto il "valore" e la "qualità" infrastrutturale degli ambienti, l'adattabilità, la connettività e l'elevato tasso di occupazione degli spazi presentano un forte impatto sulla salute, sull'istruzione, sull'educazione e sui profili lavorativi.

La ventilazione meccanica è una tecnologia utilizzata per garantire un ricambio controllato dell'aria all'interno degli edifici, migliorando la qualità del comfort delle persone e riducendo la probabilità di malattie respiratorie. Fra tutte le diverse tipologie di ambienti, le aule scolastiche rappresentano un caso particolarmente critico in quanto caratterizzate da elevati affollamenti in cui la ventilazione meccanica può avere un impatto significativo sulla salute e sulla produttività degli studenti e del personale.

Il presente **rapporto tecnico** ha l'obiettivo di fornire criteri chiari, verificabili e replicabili per la progettazione, l'installazione, la gestione e la valutazione dei sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) negli edifici scolastici, con particolare attenzione alle scuole esistenti. Il documento nasce dall'esigenza di coniugare in modo coerente requisiti igienico-sanitari, prestazioni energetiche, comfort acustico e vincoli architettonici, alla luce del quadro normativo nazionale ed europeo e delle indicazioni più recenti in tema di qualità dell'aria interna, sicurezza e sostenibilità negli edifici pubblici.

A partire da un **inquadramento generale sul tema della qualità degli ambienti interni** nelle scuole, il rapporto descrive le principali famiglie di inquinanti presenti negli ambienti didattici, le loro sorgenti, il ruolo degli edifici e degli impianti nel favorirne o nel contenerne l'accumulo, e le implicazioni per la salute, il benessere e le capacità di apprendimento degli studenti. In questo quadro viene messo in evidenza il ruolo centrale della ventilazione, naturale e meccanica, come strumento per garantire adeguati livelli di Indoor Air Quality, richiamando i principali riferimenti tecnici e normativi (UNI EN 16798-1 e 3, CAM Edilizia, D.M. 18/12/1975).

Il rapporto presenta quindi in modo sistematico le diverse **tipologie di sistemi VMC** applicabili al contesto scolastico, con particolare riguardo agli **edifici esistenti**: soluzioni centralizzate e decentrate, con o senza canalizzazioni, unità esterne alle aule o installate direttamente negli ambienti didattici. Per ciascuna opzione vengono discussi i criteri di scelta in funzione delle caratteristiche dell'edificio, dei vincoli spaziali e impiantistici, delle esigenze acustiche e della continuità del servizio scolastico, nonché gli aspetti legati alla regolazione, al monitoraggio (in particolare della CO₂) e alla manutenzione programmata.

Una parte sostanziale del documento è dedicata alla **caratterizzazione delle aule scolastiche** e alla **descrizione delle tipologie più ricorrenti**, sia dal punto di vista geometrico e illuminotecnico, sia in termini di requisiti normativi di superficie, volume e affollamento. Questi elementi costituiscono la base per il **corretto dimensionamento delle portate d'aria** e per la **valutazione delle prestazioni attese** in termini di qualità dell'aria e comfort. Il rapporto integra, inoltre, l'analisi della ventilazione con quella del **comfort acustico**, richiamando le norme tecniche come riferimento cogente per le scuole, e illustrando gli indicatori chiave (tempo di riverberazione, intelligibilità del parlato, rumore degli impianti) e i protocolli di misura in opera adottati nel progetto necessARIA.

Il documento riporta poi i risultati **di campagne di monitoraggio in scuole reali**, con confronto tra aule dotate di VMC e aule ventilate solo tramite apertura delle finestre, in diversi contesti climatici italiani. L'analisi si concentra in particolare sull'andamento della CO₂, sulle categorie di qualità dell'aria e della temperatura previste dalla UNI EN 16798-1 e sugli effetti della VMC nella pratica d'uso quotidiana. Accanto alle evidenze di campo, viene presentata l'attività del **"Laboratorio dell'aria"**, una camera test in cui sono stati studiati, in condizioni controllate, il comportamento di diversi inquinanti (CO₂, particolato, formaldeide, TVOC) e l'efficacia relativa di aerazione naturale, VMC e soluzioni aggiuntive come pellicole fotocatalitiche.

Sulla base di queste evidenze sperimentali e dei casi studio, il rapporto propone un **modello di bando di gara** per le amministrazioni scolastiche, con requisiti tecnici minimi e criteri premianti per la regolazione e il monitoraggio, e sviluppa un sistema di rating comparativo per le diverse soluzioni disponibili (VMC centralizzate e decentrate, purificatori d'aria), mettendo in relazione costi, complessità progettuale, prestazioni acustiche e classe di qualità dell'aria raggiungibile. Infine, viene presentato un quadro **metodologico per l'analisi socio-economica** degli interventi di VMC nelle scuole, che integra approcci statistici e di analisi costi-benefici lungo il ciclo di vita degli impianti, allo scopo di supportare i decisori pubblici nella valutazione della convenienza complessiva, non solo economica ma anche sanitaria, sociale e ambientale, degli investimenti in ventilazione meccanica controllata nel settore scolastico.



1. Qualità degli ambienti interni nelle scuole

- ▶ *Clara Peretti - Consulente Provincia autonoma di Bolzano, Laboratorio Analisi Aria e Radioprotezione*
- ▶ *Gianmaria Fulci - Provincia autonoma di Bolzano, Laboratorio Analisi Aria e Radioprotezione*
- ▶ *Costanzo di Perna - DIISM, Università Politecnica delle Marche*
- ▶ *Sergio Montelpare - INGEO, Università degli studi G. d'Annunzio*

L'ambiente indoor è un ambiente chiuso, separato dall'esterno da pareti, pavimento e soffitto. All'interno di questo ambiente svolgiamo le nostre attività di vita quotidiane come dormire, mangiare, studiare, lavorare e soprattutto, all'interno di questi ambienti passiamo più del 90% della nostra vita. Il metabolismo delle persone, le attività svolte e i materiali impiegati per realizzare l'ambiente indoor fanno sì che chi ci si trova dentro è esposto a una qualità dell'aria generalmente peggiore rispetto a quella dell'aria esterna. Gli inquinanti che creano il peggioramento dell'aria che respiriamo si presentano sotto forma di particolato (polveri PM), vapori e gas. Inoltre, all'interno di ambienti moderni, realizzati con criteri di risparmio energetico, gli scambi dell'aria interna con quella esterna sono limitati e provocano un maggiore accumulo degli inquinanti peggiorando la situazione. Ecco il motivo per cui la qualità dell'aria di un ambiente indoor è un problema. Ma la problematica dell'aria indoor era già nota da tempo: nel 1850 l'igienista tedesco Max Pettenkofer, propose un limite per la concentrazione di CO₂ all'interno delle aule scolastiche pari a 1000 ppm (parti per milione). Oggi, nel 2026, tutte le valutazioni di qualità dell'aria in ambiente indoor ruotano ancora intorno a questo valore, perché ancora ritenuto valido.

Il rimedio per migliorare la qualità dell'aria indoor è stato la realizzazione di finestre apribili (aerazione), a questo sistema, col tempo, si sono aggiunti dei sistemi meccanici per il ricambio dell'aria (ventilazione meccanica controllata). Poi, con l'avvento della pandemia da COVID, l'attenzione sulla qualità dell'aria indoor è salita a livelli come mai prima, c'è stata una "disperata" richiesta di sistemi che limitassero la diffusione del virus all'interno delle scuole, ma anche di altri ambienti pubblici e il mercato ha risposto proponendo diverse soluzioni per purificare l'aria.

Negli edifici scolastici la qualità dell'aria interna è fondamentale sia per la tutela della salute sia per garantire buone condizioni di attenzione e apprendimento. Le scuole sono ambienti particolari: le aule sono spesso molto affollate, gli studenti vi trascorrono molte ore al giorno e non di rado gli edifici sono datati o poco adeguati dal punto di vista della ventilazione. In questo contesto, gli inquinanti derivano da una combinazione di sorgenti interne ed esterne e la loro concentrazione aumenta facilmente quando il ricambio d'aria è insufficiente, i sistemi tecnici non sono ben mantenuti o la temperatura interna è troppo elevata.

Gli inquinanti principali che si riscontrano negli ambienti scolastici possono essere riassunti così:

- anidride carbonica (CO₂)
- composti organici volatili (VOC) e composti organici volatili totali (TVOC)
- formaldeide
- radon
- polveri sottili (particolato PM10 e PM2,5)
- ossidi di azoto, in particolare biossido di azoto (NO₂)
- agenti biologici (batteri, muffe, lieviti, pollini, virus, ecc.)
- fibre di amianto, quando ancora presenti nei materiali edilizi

L'**anidride carbonica** non è, alle concentrazioni tipiche delle aule, un inquinante tossico in senso stretto, ma è il principale indicatore dello stato di ventilazione. La sorgente interna dominante è la respirazione degli occupanti: in una classe numerosa, con finestre chiuse o con ventilazione insufficiente, la CO₂ aumenta rapidamente rispetto al valore dell'aria esterna. Concentrazioni interne

elevate indicano che l'aria di rinnovo è scarsa e che, insieme alla CO₂, si stanno probabilmente accumulando anche altri inquinanti prodotti dalle persone, dai materiali o dalle attività.

I **composti organici volatili e i TVOC** comprendono un'ampia gamma di sostanze (solventi, idrocarburi, aldeidi, terpeni, ecc.). Nell'ambiente scolastico provengono soprattutto da sorgenti interne: materiali da costruzione (pitture, intonaci, pannelli), arredi in truciolare o altri compositi lignei con resine, pavimenti e rivestimenti in PVC o in altri polimeri, colle e sigillanti, prodotti per la pulizia e la disinfezione, attività di laboratorio, stampa e fotocopiatura intensive, lavori creativi con colle e colori. Anche le persone contribuiscono con prodotti cosmetici, spray e emissioni metaboliche. Dall'esterno arrivano VOC legati al traffico veicolare e alle emissioni di impianti civili e industriali. Temperatura elevata e umidità contribuiscono ad aumentare le emissioni dai materiali e, se il ricambio d'aria è scarso, le concentrazioni possono crescere sensibilmente.

All'interno della famiglia dei VOC, la **formaldeide** rappresenta un inquinante di particolare rilevanza sanitaria, perché classificata cancerogena e dotata di limiti specifici di concentrazione. Le sue sorgenti tipiche nelle scuole sono le resine urea formaldeide utilizzate nella produzione di pannelli di truciolare, compensati, arredi e alcuni materiali isolanti; colle, vernici, trattamenti di tappezzerie e tendaggi, prodotti per la pulizia. Una parte può provenire dai processi di combustione (ad esempio caldaie, se non correttamente gestite), ma spesso il contributo strutturale e di arredo è il più significativo. La formaldeide può essere emessa a basse dosi per anni: per questo la scelta dei materiali, la ventilazione e l'aerazione soprattutto dopo ristrutturazioni o rinnovo degli arredi sono aspetti cruciali per ridurre l'esposizione.

Il **radon** è un gas radioattivo di origine naturale che deriva dal decadimento dell'uranio presente nel suolo e nelle rocce. Rappresenta un inquinante "esterno" che entra negli edifici attraverso fessure e giunti nelle fondazioni, passaggi di impianti, pavimenti a contatto con il terreno e, in minor misura, alcuni materiali da costruzione. Una volta all'interno, tende ad accumularsi soprattutto nei piani interrati e ai piani terra, in funzione della tenuta dell'edificio, della differenza di pressione tra interno ed esterno e del tasso di ventilazione. Temperature interne più elevate rispetto all'esterno e depressioni alla base dell'edificio possono favorire il richiamo di radon dal sottosuolo. La gestione del rischio richiede misure di lunga durata (su base annuale) e, se necessario, interventi specifici di mitigazione e miglioramento della ventilazione.

Le **polveri aerodisperse (particolato)** sono costituite da particelle solide o liquide sospese in aria. Il PM₁₀ (diametro fino a 10 µm) può raggiungere le vie respiratorie superiori, mentre il PM_{2,5} (diametro fino a 2,5 µm) penetra più in profondità nei polmoni. All'esterno, le principali sorgenti sono il traffico su gomma (gas di scarico e risollevarimento di polveri stradali), gli impianti di riscaldamento a combustibile, le combustioni di biomassa e altre attività emissive. All'interno delle scuole, il particolato proviene dal sollevamento delle polveri depositate dovuto al movimento degli studenti e alla pulizia non sempre efficace, dalla desquamazione della pelle, da fibre tessili, da eventuali sorgenti di combustione (stufe, cucine scolastiche, apparecchi a gas), dal rilascio dei materiali edili e da impianti di ventilazione o condizionamento mal mantenuti. Il particolato esterno può infiltrarsi attraverso le finestre e le prese d'aria. Il tasso di ventilazione, la presenza di sistemi filtranti adeguati e la cura nella manutenzione degli impianti incidono in modo determinante sui livelli di PM₁₀ e PM_{2,5} all'interno.

Gli **ossidi di azoto**, e in particolare il biossido di azoto (NO₂), sono gas irritanti prodotti dalle combustioni. Le sorgenti esterne più rilevanti per le scuole sono il traffico veicolare, soprattutto se l'edificio si affaccia su strade molto trafficate, e gli impianti termici civili o industriali nelle vicinanze. All'interno possono contribuire caldaie e generatori con scarichi mal progettati o mal funzionanti, eventuali apparecchi a gas per cucine e laboratori, nonché, in teoria, il fumo di tabacco – che tuttavia, per legge, non dovrebbe essere presente in ambito scolastico. La concentrazione di NO₂

nelle aule dipende sia dalla presenza di sorgenti interne, sia dall'ingresso dell'aria esterna inquinata attraverso aperture, infiltrazioni o sistemi di ventilazione. Una buona progettazione delle prese d'aria, la distanza da sorgenti emmissive e una corretta manutenzione degli impianti termici sono elementi fondamentali per ridurre questo inquinante.

Un altro gruppo di inquinanti è costituito dagli **agenti biologici**, ovvero microrganismi e particelle di origine organica presenti nell'aria e sulle superfici. Nell'aria interna delle scuole si possono trovare batteri, funghi (muffe e lieviti), virus, pollini, spore, frammenti di acari e altri componenti biologici veicolati dal materiale particellare. Le sorgenti interne principali sono gli stessi occupanti (che introducono microrganismi, li rimettono in sospensione, portano polvere e particelle con abiti e oggetti), i depositi di polvere, residui organici e sporco sulle superfici, lo sviluppo di muffe in presenza di umidità elevata o condensazioni, nonché i sistemi di ventilazione e condizionamento se non adeguatamente puliti e sanificati. Dall'esterno provengono soprattutto pollini e spore fungine trasportati dal vento. La concentrazione e la tipologia di agenti biologici sono influenzate dal tasso di ventilazione, dalla temperatura, dall'umidità relativa, dallo stato delle strutture (ponti termici, infiltrazioni) e dalle pratiche di pulizia. Nelle scuole i rischi principali sono di tipo infettivo e allergico, particolarmente rilevanti per bambini e soggetti predisposti.

Infine, un inquinante molto specifico ma potenzialmente grave è rappresentato dalle **fibre di amianto**, quando siano ancora presenti materiali che le contengono in edifici costruiti o ristrutturati prima del divieto d'uso. Nei contesti scolastici l'amianto può trovarsi, ad esempio, in pavimenti in vinilamianto, intonaci e rivestimenti, isolanti dietro i radiatori, guarnizioni di caldaie, elementi in cemento amianto. Questi materiali non emettono fibre in maniera significativa se sono integri e non vengono disturbati: la semplice presenza non comporta automaticamente un rischio elevato. Diventano però sorgenti di inquinamento interno quando si degradano, vengono danneggiati, forati o lavorati senza adeguate precauzioni, rilasciando fibre respirabili nell'aria. In tal caso la fonte è interna e strettamente legata allo stato di conservazione dei materiali e agli interventi effettuati sulle strutture. La normativa prevede l'individuazione, la sorveglianza periodica e, se necessario, la bonifica in condizioni controllate.

Nel complesso, la qualità dell'aria negli edifici scolastici è il risultato dell'interazione tra:

- sorgenti interne (persone, materiali, arredi, attività didattiche e di servizio, impianti);
- sorgenti esterne (traffico, impianti civili e industriali, suolo e sottosuolo, aria outdoor in generale);
- caratteristiche dell'edificio (tenuta all'aria, esposizione, tipologia di materiali, presenza e tipo di impianti di ventilazione);
- modalità di gestione (apertura delle finestre, manutenzione degli impianti, pulizia, controllo di temperatura e umidità).

Un buon controllo della qualità dell'aria passa quindi dalla conoscenza delle principali famiglie di inquinanti e delle loro sorgenti, dall'**attenzione al ricambio d'aria** e alla **manutenzione**, nonché dalla scelta consapevole di materiali e prodotti utilizzati all'interno della scuola.



2. Sistemi di Ventilazione Meccanica controllata (VMC) per le scuole

- ▶ *Costanzo di Perna - DIISM, Università Politecnica delle Marche*
- ▶ *Clara Peretti - Consulente Provincia autonoma di Bolzano, Laboratorio Analisi Aria e Radioprotezione*

La Ventilazione Meccanica Controllata (VMC) negli edifici scolastici esistenti ha l'obiettivo di garantire adeguati livelli di qualità dell'aria interna (IAQ), ridurre la concentrazione di CO₂, inquinanti e bioaerosol, limitare i rischi di contagio per via aerea, migliorare il comfort termo-igrometrico e acustico e, al contempo, ridurre i consumi energetici rispetto all'aerazione manuale non controllata. L'introduzione di sistemi VMC in scuole esistenti richiede un'attenzione particolare all'integrazione con le strutture esistenti, alla minimizzazione degli interventi invasivi e alla corretta gestione dei vincoli architettonici, impiantistici e normativi.

Riferimenti normativi e linee guida (Italia/UE)

I principali riferimenti normativi sono rappresentati dalle norme UNI EN 16798-1/3 (ex EN 15251), che definiscono criteri di ventilazione e qualità dell'aria interna, dal D.Lgs. 81/2008 in materia di tutela della salute e sicurezza nei luoghi di lavoro (applicabile al personale scolastico), dal D.M. 18/12/1975 e successivi aggiornamenti riguardanti l'edilizia scolastica, nonché dalle indicazioni di ISS, INAIL, ASL/ATS e dalle linee guida regionali sulla qualità dell'aria interna nelle scuole. Devono inoltre essere considerati i riferimenti relativi all'efficienza energetica, quali il D.Lgs. 192/2005 e s.m.i., il D.M. "Requisiti Minimi" e le direttive EPBD.

Criticità tipiche delle scuole esistenti

Le scuole esistenti presentano spesso criticità quali il sovraffollamento delle aule rispetto alle cubature originarie, una aerazione insufficiente dovuta a serramenti non performanti, limitazioni all'apertura delle finestre o presenza di disturbi acustici esterni, nonché edifici vetusti con spazi tecnici limitati per canalizzazioni e macchinari.

A queste si aggiungono in alcune situazioni vincoli architettonici o storici che limitano gli interventi invasivi in facciata o in copertura, la presenza di impianti termici tradizionali (ad esempio radiatori con caldaia centralizzata) e la necessità di rispettare requisiti di comfort acustico elevati, che impongono emissioni sonore delle unità di ventilazione estremamente contenute.

2.1 Modalità di installazione negli edifici esistenti

Analisi preliminare

La fase iniziale del progetto richiede un **rilevato architettonico, strutturale e impiantistico** dettagliato dell'edificio scolastico. Devono essere verificate le altezze nette disponibili e la possibilità di realizzare controsoffitti tecnici, i possibili percorsi per canalizzazioni e passaggi attraverso solai e pareti, le aree idonee all'installazione dei sistemi di ventilazione o delle unità decentralizzate e l'eventuale presenza di vincoli architettonici e paesaggistici, in particolare negli edifici di pregio storico.

Contestualmente, è necessario analizzare lo stato di fatto dell'impianto termico e dei sistemi di regolazione per valutare le modalità di integrazione con la nuova VMC.

Scelte impiantistiche

La scelta della soluzione impiantistica deve tenere conto delle **caratteristiche dell'edificio** e degli obiettivi dell'intervento. In assenza di cavedi o controsoffitti e in presenza di edifici vincolati o nei quali si vogliono limitare tempi e costi di cantiere, è preferibile optare per soluzioni decentralizzate per singola aula.

I sistemi centralizzati risultano invece più indicati quando si prevedono interventi già molto invasivi sull'edificio, come una riqualificazione energetica profonda, un rifacimento della copertura o una sostituzione completa dell'impianto termico, e quando sono disponibili spazi tecnici adeguati ad accogliere i sistemi e le canalizzazioni.

Interferenze con l'uso scolastico

Le lavorazioni più invasive devono essere programmate preferibilmente durante i periodi di chiusura scolastica (ad esempio nei mesi estivi o in occasione delle vacanze), privilegiando soluzioni costruttive "a secco", quali la realizzazione di fori, i fissaggi meccanici e l'impiego di canalizzazioni leggere, allo scopo di ridurre al minimo i tempi di cantiere.

È inoltre opportuno limitare la produzione di polveri e il rumore da cantiere mediante una adeguata compartimentazione delle aree di lavoro e la pianificazione delle fasi operative in orari compatibili con le attività didattiche residue.

Regolazione, controllo e monitoraggio

Un sistema VMC efficiente in ambito scolastico deve essere dotato di sensori ambiente per la misura della **CO₂**, della temperatura e dell'umidità relativa. La regolazione della portata deve essere automatica, con modulazione dei ventilatori che consenta di passare da portate ridotte in condizioni di scarsa o assente presenza, a portate nominali in corrispondenza degli orari di lezione e di occupazione massima delle aule.

È auspicabile la presenza di un sistema di supervisione centralizzata, in grado di gestire l'esercizio su base oraria e su calendario scolastico, di segnalare eventuali allarmi (filtri intasati, guasti ai ventilatori o alle sonde) e di storicizzare i dati principali, quali concentrazione di CO₂, portate e consumi elettrici.

Si raccomanda anche l'installazione in aula di indicatori di qualità dell'aria (ad esempio display o segnalatori a "semaforo" basati sui livelli di CO₂), utili per sensibilizzare docenti e alunni, verificare il corretto funzionamento dei sistemi e supportare, se necessario, una aerazione naturale integrativa tramite aperture controllate delle finestre.

Manutenzione e gestione

La progettazione deve comprendere un piano di manutenzione programmata, che preveda la sostituzione dei filtri due-quattro volte all'anno, in funzione della qualità dell'aria esterna e del tempo effettivo di funzionamento degli impianti, e la pulizia periodica degli scambiatori di calore e delle canalizzazioni, qualora presenti, nel rispetto delle norme UNI e delle indicazioni dei costruttori.

Devono inoltre essere previste verifiche e tarature periodiche delle sonde di CO₂ e temperatura, controlli a campione della rumorosità in ambiente e delle portate effettive nelle aule. È fondamentale definire in modo chiaro il soggetto responsabile della gestione (ente proprietario, gestore del servizio energia, ditta esterna), le risorse economiche destinate alla manutenzione ordinaria e straordinaria e le procedure di segnalazione dei guasti e di intervento.

L'introduzione della **Ventilazione Meccanica Controllata** nelle scuole esistenti costituisce un intervento strategico per migliorare in modo strutturale la qualità dell'aria interna, contenere i rischi igienico-sanitari, anche in ottica di prevenzione delle infezioni respiratorie, e utilizzare l'energia in modo più efficiente rispetto all'aerazione manuale non controllata.

La **progettazione** deve tuttavia essere fortemente contestualizzata al singolo edificio, bilanciando gli obiettivi igienico-sanitari e di comfort con i vincoli architettonici e strutturali, gli aspetti acustici e la necessità di garantire la continuità del servizio scolastico, nonché la sostenibilità economica sia dell'investimento iniziale sia della gestione nel tempo.

3 Caratterizzazione delle classi scolastiche, tipologie più frequenti

- ▶ *Costanzo di Perna - DIISM, Università Politecnica delle Marche*
- ▶ *Serena Summa - DIISM, Università Politecnica delle Marche*

3.1 Analisi

L'interesse per l'edilizia scolastica e per la progettazione degli spazi educativi rappresenta da tempo un tema centrale nel dibattito pedagogico, architettonico e normativo. La realizzazione di ambienti inclusivi, privi di barriere e in grado di facilitare l'accesso, la partecipazione alla vita scolastica e lo svolgimento delle attività didattiche costituisce infatti un obiettivo consolidato sia nella progettazione degli edifici sia nell'organizzazione degli spazi destinati all'apprendimento. In questa prospettiva, l'ambiente scolastico non rappresenta soltanto il contenitore fisico delle attività educative, ma configura un elemento che contribuisce attivamente alla qualità dei processi formativi.

La ricerca pedagogica ha evidenziato come i processi educativi siano strettamente connessi anche all'organizzazione e alla configurazione degli spazi. La possibilità di adattare e riconfigurare gli ambienti in funzione delle esigenze didattiche consente infatti di rendere lo spazio maggiormente rispondente ai bisogni di chi lo utilizza. Lo spazio può quindi essere considerato una vera e propria risorsa educativa, in grado di sostenere i processi di apprendimento e di influenzare le modalità con cui si sviluppano le relazioni educative e sociali all'interno della scuola.

In tale contesto, l'organizzazione degli ambienti, la loro flessibilità, la qualità degli spazi comuni e la possibilità di modulare la configurazione delle aule in funzione delle diverse attività didattiche rappresentano elementi sempre più rilevanti nella progettazione scolastica contemporanea.

Nel corso degli ultimi decenni, il modello tradizionale dell'aula scolastica è stato progressivamente oggetto di revisione. L'evoluzione degli spazi educativi si è sviluppata parallelamente ai cambiamenti dei modelli pedagogici e delle metodologie didattiche. Accanto agli aspetti strutturali degli edifici - quali dimensioni degli ambienti, illuminazione naturale, comfort acustico e qualità dei materiali - è cresciuta l'attenzione verso la flessibilità degli spazi e la loro capacità di adattarsi a diverse modalità di insegnamento e apprendimento.

Anche l'introduzione di nuove tecnologie didattiche ha contribuito a ridefinire l'organizzazione degli ambienti di apprendimento. La diffusione di strumenti digitali, quali lavagne interattive multimediali (LIM), dispositivi digitali individuali e piattaforme per la didattica digitale, ha progressivamente modificato la relazione tra docente, studenti e spazio dell'aula. In molti contesti educativi si osserva inoltre un'evoluzione degli arredi scolastici e dell'organizzazione degli spazi, con configurazioni più flessibili e dinamiche, una minore centralità della cattedra e una maggiore diffusione di modalità di apprendimento collaborativo e laboratoriale.

Parallelamente a queste trasformazioni pedagogiche e tecnologiche, è emersa con crescente evidenza l'importanza della qualità dell'ambiente interno degli edifici scolastici. Parametri quali illuminazione, comfort acustico, comfort termico e qualità dell'aria interna (Indoor Air Quality - IAQ) incidono in modo significativo sul benessere degli studenti e del personale scolastico, nonché sulle capacità di concentrazione, apprendimento e partecipazione alle attività didattiche. Negli ambienti scolastici, caratterizzati da elevata densità di occupazione e da tempi di permanenza prolungati, la gestione della qualità dell'aria interna assume pertanto un ruolo particolarmente rilevante. La presenza simultanea di numerosi occupanti determina infatti un rapido incremento della concentrazione di anidride carbonica (CO₂), aerosol respiratori e altri inquinanti indoor, con possibili effetti negativi sul comfort ambientale e sulle prestazioni cognitive degli studenti.

In questo contesto, la ventilazione degli ambienti scolastici assume un ruolo centrale nella progettazione, nella gestione e nella riqualificazione degli edifici destinati all'istruzione. Il ricambio dell'aria può essere garantito mediante ventilazione naturale, attraverso l'apertura delle finestre, oppure mediante sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC), in grado di assicurare portate d'aria costanti e controllate indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne.

I **sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC)** rappresentano una soluzione efficace per garantire adeguate condizioni di qualità dell'aria interna negli edifici scolastici, inclusi quelli di nuova costruzione caratterizzati da elevati livelli di tenuta all'aria dell'involucro edilizio. In questi ambienti, assicurare ricambi d'aria continui è fondamentale per mantenere le concentrazioni degli inquinanti interne entro i limiti stabiliti dai criteri prestazionali della norma UNI EN 16798-1.

La VMC consente un ricambio d'aria controllato e costante negli spazi occupati e, a parità di volume d'aria rinnovato, risulta più efficiente dal punto di vista energetico rispetto alla ventilazione naturale mediante apertura delle finestre. Ciò è reso possibile dai recuperatori di calore, che trasferiscono parte dell'energia termica dall'aria espulsa a quella immessa, riducendo le perdite energetiche e migliorando l'efficienza complessiva dell'edificio, in linea con i principi del Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 sui requisiti minimi di prestazione energetica.

È tuttavia opportuno sottolineare che l'installazione di un sistema di VMC comporta consumi energetici aggiuntivi rispetto alla condizione senza ventilazione meccanica. In assenza di VMC, sebbene i consumi possano essere inferiori, i livelli di qualità dell'aria interna rischiano di non essere adeguati e non conformi ai Criteri Ambientali Minimi per l'edilizia, che promuovono il miglioramento delle condizioni di salubrità negli edifici pubblici.

Per valutare la VMC bisogna confrontare i consumi a parità di qualità dell'aria. Se prima il ricambio dell'aria era basso, la VMC farà aumentare i consumi a favore di una migliore qualità dell'aria.

- **Confronto REALE – prima e dopo l'intervento (IAQ diversa).**

Questa è la situazione che normalmente si trova nelle aule scolastiche

o Situazione “prima”: solo finestre, IAQ scarsa

vs

o Situazione “dopo”: VMC, IAQ buona

- **Confronto TEORICO – a parità di qualità dell'aria (stessa IAQ).**

Questa situazione è teorica

o Finestre aperte “quanto basta” per avere buona IAQ

vs

o VMC progettata per garantire la stessa buona IAQ

Confronto REALE prima/dopo, IAQ diversa

Qui il confronto è tra due situazioni reali tipiche:

PRIMA – solo finestre, IAQ scarsa

- Finestre aperte poco (per freddo, rumore, sicurezza...)
- Pochi ricambi d'aria ► **CO₂ e inquinanti alti**
- Consumi energetici relativamente bassi (perché in realtà si ventila poco)

DOPO – VMC, IAQ buona

- Ricambi d'aria continui e controllati ► **CO₂ e inquinanti sotto controllo**
- Ventilatori + recuperatore di calore sempre in funzione
- Consumi energetici **più alti di "PRIMA"**, perché ora si fa davvero la ventilazione necessaria

Se confronto una situazione 'prima' con aria scarsa ma pochi consumi con una 'dopo' con aria sana e VMC, i consumi totali crescono: pago l'energia che prima 'risparmiavo' non ventilando a sufficienza.

Confronto TEORICO – stessa IAQ, finestre vs VMC

Obiettivo: stessa qualità dell'aria interna (stessi ricambi d'aria).

Finestre (aerazione)

- Per avere buona IAQ in inverno ► apro spesso/parecchio
- Conseguenza: entra molta aria fredda ► **più energia per riscaldare**

VMC con recupero di calore

- Stessi ricambi d'aria programmati (stessa IAQ)
- L'aria esterna viene preriscaldata dal recuperatore
- Conseguenza: serve **meno energia per riscaldare** rispetto alle sole finestre

A parità di qualità dell'aria, **la VMC con recupero consuma meno energia** termica rispetto all'aerazione solo da finestre.

Confronto corretto (stessa IAQ)	CONFRONTO REALE "PRIMA/DOPO"
<ul style="list-style-type: none">• Finestre (molta aria fredda da riscaldare) ► più energia termica• VMC con recupero (aria preriscaldata) ► meno energia termica	<ul style="list-style-type: none">• Finestre (molta aria fredda da riscaldare) ► più energia termica• VMC con recupero (aria preriscaldata) ► meno energia termica

L'elaborazione di **criteri di progettazione** specifici per la ventilazione delle aule scolastiche risponde pertanto alla necessità di integrare gli aspetti pedagogici, architettonici, impiantistici e igienico-sanitari nella progettazione e nella gestione degli spazi educativi, contribuendo alla realizzazione di ambienti scolastici salubri, confortevoli e favorevoli ai processi di apprendimento.

3.2 Requisiti normativi degli spazi scolastici e affollamento delle aule

La definizione dei requisiti minimi relativi agli spazi scolastici deriva da un quadro normativo sviluppatosi nel tempo e progressivamente integrato da disposizioni relative all'organizzazione didattica, alla sicurezza e alla prevenzione degli incendi. Tali norme costituiscono il riferimento per il dimensionamento degli ambienti scolastici e per la determinazione dei parametri di affollamento delle aule, elementi rilevanti anche per la progettazione dei sistemi di ventilazione e per la valutazione della qualità dell'aria interna.

Uno dei principali riferimenti normativi per la progettazione degli edifici scolastici è il **Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975**, che definisce gli indici di funzionalità didattica, edilizia e urbanistica da adottare nella realizzazione delle opere di edilizia scolastica. Il decreto stabilisce, tra l'altro, i requisiti dimensionali minimi delle aule.

In particolare, è prevista una superficie minima pari a **1,80 m² per alunno** per le scuole dell'infanzia, primarie e secondarie di primo grado, mentre per le scuole secondarie di secondo grado la superficie minima è pari a **1,96 m² per alunno**. Il decreto stabilisce inoltre un'altezza minima dei locali pari a **3 m**, al fine di assicurare adeguate condizioni di aerazione, illuminazione e comfort ambientale.

Il medesimo provvedimento disciplina anche alcuni requisiti relativi all'illuminazione naturale degli ambienti scolastici, stabilendo che la superficie finestrata debba essere **maggiore o uguale a 1/8 della superficie pavimentata**.

La norma **UNI EN 17037** introduce invece il parametro del **fattore medio di luce diurna (Daylight Factor – DF)**. Per gli ambienti destinati alle attività didattiche — quali aule per lezione, studio, lettura, laboratori e disegno — il valore raccomandato è pari al 3%, mentre valori inferiori sono previsti per altri ambienti dell'edificio scolastico. Tali parametri hanno lo scopo di garantire adeguate condizioni di illuminazione naturale, contribuendo al comfort visivo degli occupanti e alla riduzione del fabbisogno di illuminazione artificiale.

Oltre ai requisiti dimensionali degli ambienti, un elemento rilevante riguarda l'affollamento delle aule, disciplinato da normative con finalità differenti. La gestione degli spazi scolastici segue un duplice binario normativo che intreccia sicurezza e criteri didattici.

Sotto il profilo della prevenzione incendi, il **Decreto Ministeriale 26 agosto 1992** stabilisce un limite massimo di **26 persone per aula** (solitamente 25 alunni e un docente). Tale parametro vincola le caratteristiche tecniche dei locali, come l'ampiezza e il verso di apertura delle porte.

Parallelamente, il **Decreto del Presidente della Repubblica 20 marzo 2009, n. 81, integrato con il Decreto Ministeriale 24 luglio 1998 n. 331**, definisce i parametri per la formazione delle classi, stabilendo soglie specifiche per ordine di scuola:

- Infanzia: 18–26 alunni
- Primaria: 15–26 alunni
- Secondaria di primo grado: 18–27 alunni,
- Secondaria di secondo grado (classi iniziali): 27–30 alunni.

Questi numeri possono variare del 10% per esigenze organizzative, mentre in presenza di studenti con disabilità è necessario ridurre la numerosità a un massimo di 20–22 alunni.

Il **Decreto Ministeriale 18/12/1975** (Spazi Minimi) prescrive un rapporto minimo di 1,80 mq per alunno nelle scuole materne, elementari e medie, e **1,96 mq per alunno** nelle scuole superiori, calcolato al netto degli arredi.

Le discrepanze tra il **limite di affollamento previsto dalla normativa antincendio e i criteri didattici** possono essere derogate mediante una dichiarazione di responsabilità del Dirigente Scolastico, con verifica da parte dei Vigili del Fuoco che assicurano il rispetto dei criteri minimi di sicurezza per il rapido deflusso in caso di emergenza, come indicato al punto 5.6 del D.M. 26 agosto 1992. In particolare, se l'aula ospita più di 26 persone, le porte devono aprirsi obbligatoriamente verso l'esterno e avere una larghezza minima di 1,20 m., rispetto ai valori standard di 0,80–0,90 m.

L'integrazione di questi limiti dimensionali e numerici rappresenta non solo la base per la sicurezza e l'inclusione, ma anche il riferimento tecnico essenziale per calcolare i ricambi d'aria necessari e garantire una corretta qualità dell'aria negli ambienti didattici.





4. Attività svolte nelle scuole della Regione Marche

► *Costanzo di Perna - DIISM, Università Politecnica delle Marche*

► *Andrea Bartoli - Regione Marche*

La campagna di misurazioni finalizzata alla valutazione dell'incidenza dei sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) nelle aule scolastiche ha interessato gli istituti che hanno partecipato al bando emanato dalla Regione Marche in attuazione della Deliberazione della Giunta Regionale n. 148 del 15 febbraio 2021.

L'intervento ha previsto l'installazione, all'interno delle aule scolastiche, di impianti di ventilazione meccanica destinati a garantire un adeguato ricambio dell'aria negli ambienti didattici.

Le attività svolte hanno incluso il censimento delle scuole della Regione Marche dotate di impianti di ventilazione meccanica controllata, con particolare riferimento ai seguenti aspetti:

- numero di istituti scolastici e di aule interessate;
- collocazione urbanistica degli edifici e prossimità a potenziali fonti di inquinamento;
- principali caratteristiche dimensionali delle aule;
- tipologia e caratteristiche degli impianti di ventilazione installati;
- misure di qualità dell'aria indoor effettuate per un campione rappresentativo di scuole selezionate.

I dati relativi agli edifici scolastici sono stati ottenuti dall'Anagrafe nazionale dell'edilizia scolastica, resa disponibile dal Ministero dell'Istruzione e del Merito, e dal Portale Unico dei Dati della Scuola, istituito dalla Legge 107/2015. Grazie all'integrazione con la banca dati regionale e all'utilizzo del codice identificativo di ciascun edificio (codice ARES), è stato possibile individuare tutti gli istituti dotati di sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC).

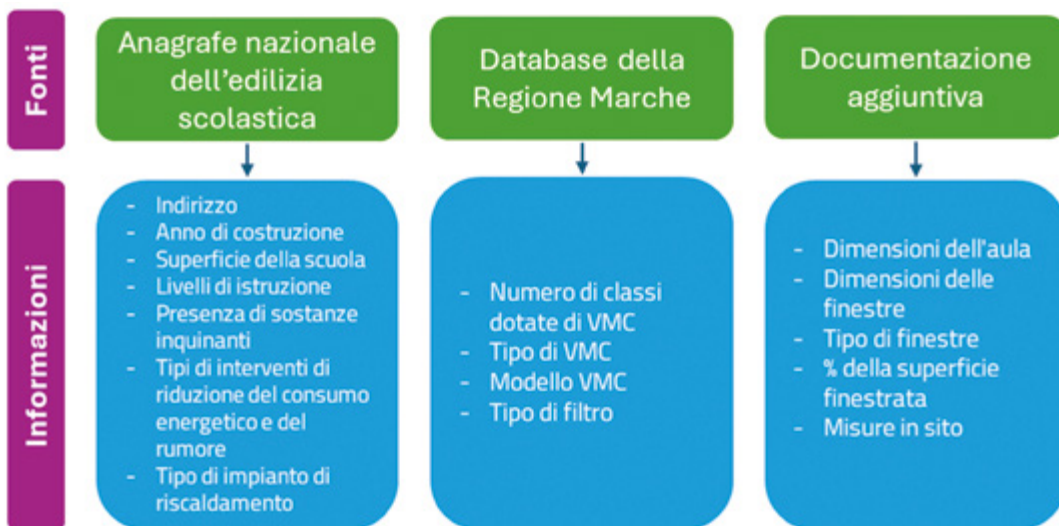


Figura 1. Informazioni raccolte sulle scuole dotate di ventilazione meccanica controllata (VMC)

Di seguito si analizzano nel dettaglio tutti i punti.

Numero di istituti scolastici e di aule interessate

Dai dati dell'Anagrafe nazionale dell'edilizia scolastica, resa disponibile dal Ministero dell'Istruzione e del Merito, nella Regione Marche risultano censiti 1934 edifici scolastici, di cui 1418 destinati ad attività didattica. Tra questi, 272 edifici scolastici hanno partecipato al bando regionale e hanno beneficiato dei finanziamenti per l'installazione di sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC), per un totale di 2268 aule dotate di tali impianti.

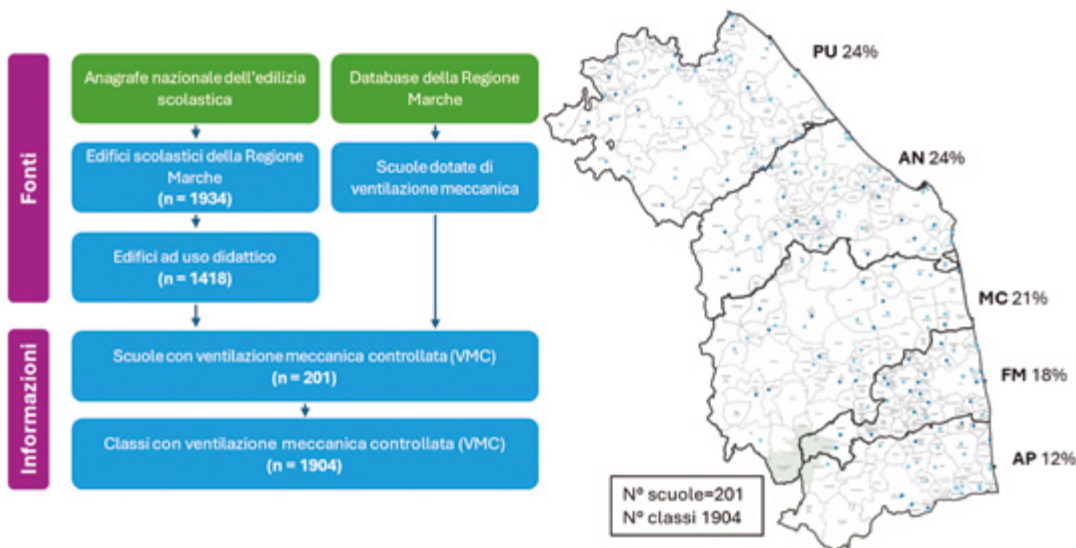


Figura 2. Ubicazione delle aule con ventilazione meccanica controllata nella Regione Marche

Il programma regionale per l'installazione di sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) negli edifici scolastici della Regione Marche è stato progettato non solo con l'obiettivo di migliorare la qualità dell'aria e le condizioni di salute negli ambienti scolastici, ma anche con l'intento di garantire una distribuzione equilibrata delle risorse sul territorio regionale.

In particolare, l'iniziativa ha mirato ad assicurare che gli interventi non si concentrassero esclusivamente nei centri urbani maggiori, ma raggiungessero anche i comuni di dimensioni più ridotte, spesso localizzati nelle aree interne e montane, che costituiscono una componente rilevante del sistema insediativo regionale e che possono presentare maggiori difficoltà di accesso alle risorse per interventi infrastrutturali.

A tal fine, le risorse complessivamente stanziare, pari a 10 milioni di euro, sono state ripartite secondo criteri di programmazione territoriale volti a favorire un'equa distribuzione degli interventi.

Un primo criterio ha riguardato la ripartizione dei fondi tra i comuni delle diverse province della regione, sulla base di indicatori quali la popolazione residente e il numero di istituti scolastici presenti, al fine di garantire un bilanciamento tra le diverse aree del territorio regionale.

Un secondo criterio ha previsto, all'interno dei singoli territori provinciali, una suddivisione delle risorse tra comuni di dimensioni maggiori e comuni di dimensioni minori. In particolare, il 50% delle risorse è stato destinato ai comuni con popolazione inferiore a 5.000 abitanti, mentre il restante 50% ai comuni con popolazione superiore a tale soglia, con l'obiettivo di sostenere in modo specifico i piccoli centri.

Nella fase di programmazione è stata inoltre prevista una quota di finanziamento destinata alle amministrazioni provinciali, proprietarie degli edifici sede degli istituti di istruzione secondaria di secondo grado.

La distribuzione territoriale delle scuole dotate di sistemi di VMC, rappresentata in Figura 2, evidenzia una maggiore concentrazione nelle province di Pesaro e Urbino e Ancona (entrambe pari al 24% del totale), seguite dalle province di Macerata (21%), Fermo (18%) e Ascoli Piceno (12%).

Al fine di valutare in modo più approfondito le caratteristiche degli ambienti scolastici dotati di ventilazione meccanica controllata e il contesto in cui tali sistemi sono stati installati, nei paragrafi successivi vengono analizzati nel dettaglio alcuni aspetti relativi all'ubicazione degli edifici rispetto le principali fonti inquinanti, alle aule interessate dagli interventi, con particolare riferimento alle caratteristiche dimensionali degli ambienti, alla tipologia degli impianti installati e alle misure di qualità dell'aria indoor effettuate in un campione di scuole selezionate.

Collocazione urbanistica degli edifici e prossimità a potenziali fonti di inquinamento

Per quanto riguarda il contesto ambientale (Figura 3), la quasi totalità degli edifici scolastici analizzati risulta localizzata in aree distanti da sorgenti rilevanti di rumore, da fonti di radiazioni elettromagnetiche e da potenziali sorgenti di inquinamento atmosferico.

In particolare, la distanza da infrastrutture ferroviarie, traffico veicolare intenso o insediamenti industriali contribuisce a limitare il potenziale ingresso negli ambienti indoor di inquinanti di origine esterna, quali monossido di carbonio (CO), black carbon (BC), ossidi di azoto (NOx), biossido di zolfo (SO₂), particolato atmosferico (PM), ozono (O₃) e composti organici volatili (VOC)

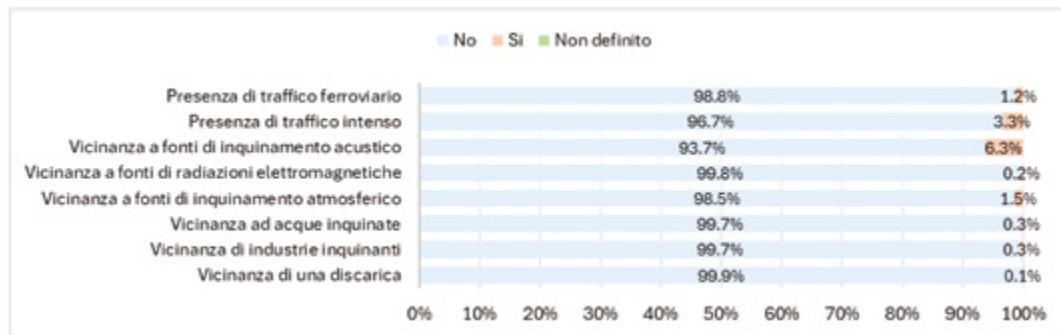


Figura 3. Presenza di possibili fonti di inquinamento nei pressi delle scuole

A prescindere da tali condizioni favorevoli, i sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) installati nelle scuole sono dotati di filtri sull'aria di immissione e di ripresa, progettati per trattenere particelle di diversa natura, con livelli di efficienza differenti (Tabella 1).

Secondo la classificazione definita dalla norma **UNI EN ISO 16890-1**, la combinazione di filtri più frequentemente utilizzata (55,7%) è ePM1 70% / ePM1 70%, seguita da ISO Coarse 55% / ePM1 80% (25,8%) e ISO Coarse 80% / ePM1 65% (3,6%).

Nel primo caso, sia l'aria immessa sia quella estratta vengono filtrate con un'efficienza del 70% per le particelle PM1. Nel secondo caso, i filtri di ingresso trattengono il 55% delle polveri grossolane, mentre quelli di uscita rimuovono l'80% delle particelle PM1. Nel terzo caso, i filtri di ingresso intercettano l'80% delle polveri grossolane, mentre quelli di uscita garantiscono un'efficienza del 65% per le particelle PM1.

Tipo di filtro Ritorno / Mandata %			
Iso Coarse 90% / ePM1 60%	3.0%	Iso Coarse 90% / ePM1 50%	0.5%
Iso Coarse 55% / ePM1 80%	25.8%	Iso Coarse 80% / ePM1 65%	3.6%
Iso Coarse 65% / ePM1 70%	0.5%	ePM1 70% / ePM1 80%	2.6%
Iso Coarse 50% / ePM2.5 95%	1.0%	ePM10 50% / ePM1 70%	1.5%
ePM2.5 55% / ePM1 65%	3.0%	ePM1 50% / ePM1 70%	0.5%
ePM1 65% / ePM1 80%	1.0%	Iso Coarse 90% / ePM10 60%	1.0%
ePM1 70% / ePM1 70%	55.7%	Iso Coarse 50% / ePM2.5 95%	0.5%

Tabella 1. Sistemi di filtraggio delle VMC installate

Principali caratteristiche dimensionali delle aule

Selezionando un'aula con VMC rappresentativa per 115 differenti scuole di cui erano a disposizione progetti con piante e sezioni, è stato possibile identificare tre tipologie di forma caratteristiche (Figura 4):

- Aula "lunga": con finestra sul lato lungo ($y/x > 1,22$)
- Aula "quadrata": con rapporto tra i lati compreso tra 0,82 e 1,22 ($0,82 \leq y/x \leq 1,22$)
- Aula "larga": con finestra sul lato corto ($y/x < 0,82$)

La tipologia più diffusa è risultata essere l'aula quadrata, con una percentuale del 60%, seguita dall'aula lunga (29%) e dall'aula larga (11%).

Inoltre, è stata calcolata la percentuale di superficie finestrata rispetto alla parete in cui è installata la finestra e in funzione della geometria dell'aula si è ottenuto che:

- Aula lunga: 25% di superficie finestrata
- Aula quadrata: 30% di superficie finestrata
- Aula larga: 40% di superficie finestrata

Tali dati sono riassunti nella Tabella 2 e nella Figura 4.

% SUPERFICIE FINESTRATA		FORMA DELLA CLASSE		
Range	Categoria	Lunga	Quadrata	Larga
0% - 15%	10%	0%	0%	0%
16% - 25%	20%	31%	23%	8%
26% - 35%	30%	31%	42%	15%
36% - 45%	40%	29%	25%	38%
46% - 55%	50%	6%	10%	23%
56% - 65%	60%	3%	0%	15%
66% - 75%	70%	0%	0%	0%

Tabella 2. Percentuali delle finestre in funzione della geometria. I valori più elevati sono evidenziati in grigio.

Collocazione urbanistica degli edifici e prossimità a potenziali fonti di inquinamento

Per quanto riguarda il contesto ambientale (Figura 3), la quasi totalità degli edifici scolastici analizzati risulta localizzata in aree distanti da sorgenti rilevanti di rumore, da fonti di radiazioni elettromagnetiche e da potenziali sorgenti di inquinamento atmosferico.

In particolare, la distanza da infrastrutture ferroviarie, traffico veicolare intenso o insediamenti industriali contribuisce a limitare il potenziale ingresso negli ambienti indoor di inquinanti di origine esterna, quali monossido di carbonio (CO), black carbon (BC), ossidi di azoto (NOx), biossido di zolfo (SO₂), particolato atmosferico (PM), ozono (O₃) e composti organici volatili (VOC)

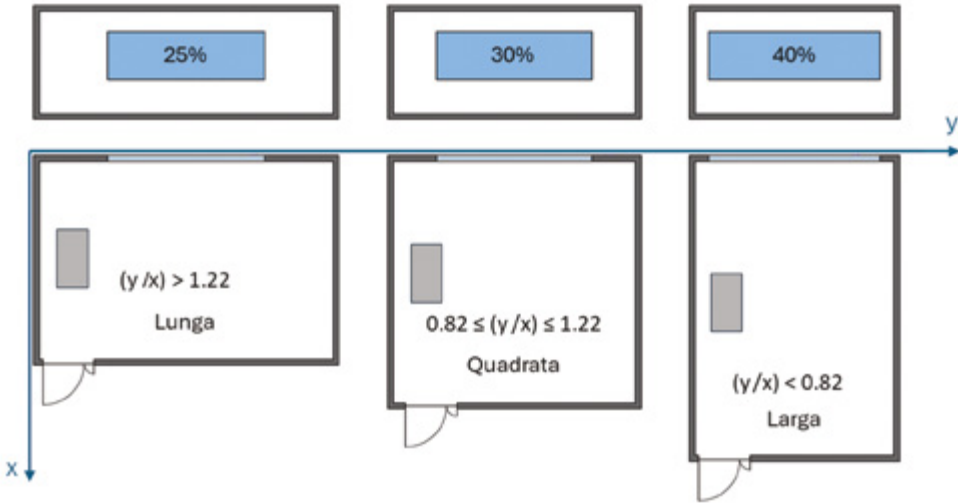


Figura 4. Geometria tipica dell'aula e percentuale relativa delle finestre

Sulla base delle percentuali di superficie finestrata identificate, sono state condotte delle simulazioni per verificare il fattore medio di luce diurna (DF) secondo la normativa UNI EN 17037 (Figura 5).

Il valore di DF, calcolato come rapporto tra l'illuminamento medio interno (Em) e l'illuminamento medio esterno (E_{0M}), deve essere maggiore o uguale al 3% per garantire un'adeguata e uniforme illuminazione naturale degli spazi educativi.

I risultati delle simulazioni hanno evidenziato che:

- Aula "lunga" (finestra da 6,5 m², pari al 25% della parete): DF = 3,7%
- Aula "quadrata" (finestra da 6,5 m², pari al 30% della parete): DF = 3,6%
- Aula "larga" (finestra da 7,0 m², pari al 40% della parete): DF = 4,2%

In tutti e tre i casi, il valore medio di luce diurna (DF) risulta verificato e conforme ai requisiti della normativa.

Tipologia e caratteristiche degli impianti di ventilazione installati

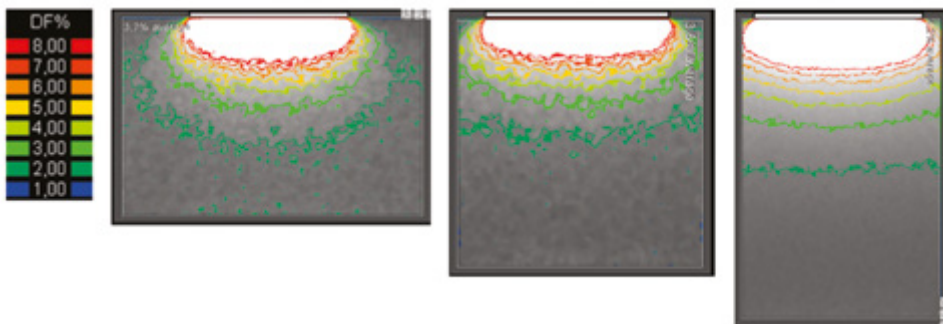


Figura 5. Calcolo del fattore di luce diurna medio per le tre diverse geometrie e superfici delle finestre delle aule scolastiche tipiche.

Per quanto riguarda i tipi di macchine di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC), sono stati identificati quattro diversi sistemi riassunti schematicamente in Figura 6:

1. Delocalizzato (D): l'unità di ventilazione è installata direttamente all'interno dell'aula, con griglie di mandata e ripresa posizionate sulla macchina stessa. Questa soluzione può prevedere un'installazione a parete (verticale) o a soffitto (orizzontale).
2. Delocalizzato con unità e condotti interni (DI): la macchina di ventilazione è alloggiata nel controsoffitto e serve una singola aula, con distribuzione dell'aria tramite canalizzazioni posizionate nel controsoffitto.
3. Delocalizzato con unità esterne all'aula (DE): le macchine di ventilazione sono situate all'esterno dell'aula, mentre le griglie di mandata e ripresa sono posizionate sulla parete adiacente alla macchina.
4. Centralizzato (C): un'unica macchina esterna serve l'intero edificio o porzioni di esso attraverso canalizzazioni.

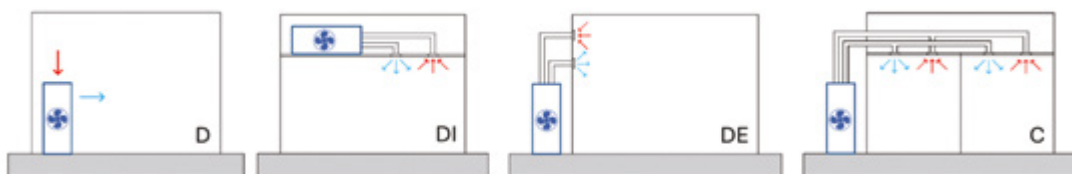


Figura 6. Tipi di macchine VMC installate

Nel 92,2% dei casi, la tipologia maggiormente utilizzata è quella delocalizzata (D). Seguono la delocalizzata con unità e condotti interni (DI) e la delocalizzata con unità esterne all'aula (DE), entrambe con il 3,2%, mentre la tipologia centralizzata (C) risulta la meno diffusa, con l'1,4% (Figura 7).

La prevalenza della tipologia delocalizzata (D) è riconducibile principalmente alla maggiore facilità di installazione negli edifici esistenti. Tali sistemi possono essere installati a livello della singola aula e richiedono interventi edilizi limitati, evitando nella maggior parte dei casi la realizzazione di reti di canalizzazione estese o modifiche significative agli spazi tecnici. Questo consente di ridurre complessità, tempi di intervento e impatto sulle attività scolastiche, rendendo tale soluzione frequentemente adottata negli interventi di riqualificazione.

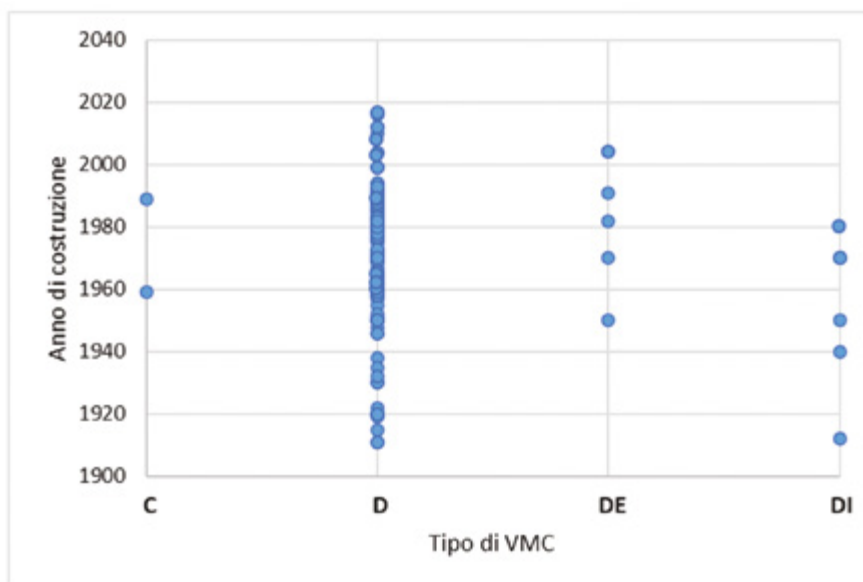


Figura 7. Identificazione del numero di macchine di ventilazione installate nelle aule scolastiche in funzione dell'anno di costruzione della scuola

Misure di qualità dell'aria indoor effettuate

Caso Studio

A seguito dell'installazione di sistemi di ventilazione meccanica in edifici scolastici situati nella Regione Marche (Italia centrale), è stato condotto uno studio finalizzato alla valutazione della qualità dell'aria interna (Indoor Air Quality – IAQ) nelle aule scolastiche.

Lo studio aveva due obiettivi principali:

- analizzare la variazione della concentrazione di CO₂ in relazione al comportamento degli occupanti e alle modalità di utilizzo del sistema di ventilazione;
- confrontare i livelli di CO₂ rilevati in aule con caratteristiche simili, distinguendo tra ambienti dotati di ventilazione meccanica e ambienti in ventilazione naturale.

Sono state monitorate tre aule di una scuola secondaria di primo grado, caratterizzate da dimensioni e livelli di occupazione comparabili (Tabella 3). Due aule sono dotate di ventilazione meccanica (MV_1 e MV_2), mentre una terza aula è in ventilazione naturale (NV).

Nell'aula MV_1, al fine di valutare l'influenza del comportamento degli occupanti sulla qualità dell'aria, sono stati installati sensori per il monitoraggio dell'apertura e chiusura di finestre e porta.

Aula	Superficie (m ²)	Volume (m ³)	Occupanti	Ventilazione	Variabili
MV_1	47	165	21	Presente	T, RH, CO ₂ , OB
MV_2	49	147	22	Presente	T, RH, CO ₂
NV	47	163	19	Assente	T, RH, CO ₂

Tabella 3. Caratteristiche delle aule oggetto dello studio e variabili misurate (T: temperatura, RH: umidità relativa, CO₂: concentrazione di anidride carbonica, OB: comportamento degli occupanti)

I sistemi installati nelle aule MV_1 e MV_2 sono costituiti da unità di ventilazione puntuali con recuperatore di calore, progettate in conformità alla normativa italiana relativa alle portate di ventilazione negli ambienti scolastici e ai limiti di rumorosità.

Le principali caratteristiche dei sistemi sono riportate di seguito:

- MV_1: portata massima 750 m³/h ($n_{\max} = 4,5$ vol/h), efficienza di recupero 85,8%, filtri G4 sull'aria estratta e F7 sull'aria esterna;
- MV_2: portata massima 1000 m³/h ($n_{\max} = 4,5$ vol/h), efficienza di recupero 80,0%, filtri F7 sia sull'aria estratta sia sull'aria esterna.

Entrambi i sistemi consentono la selezione di tre livelli di ventilazione, impostabili manualmente tramite interfaccia installata in aula oppure mediante programmazione automatica.

Durante il periodo di monitoraggio (14–21 marzo 2023) sono stati inoltre registrati gli orari di funzionamento dei sistemi e i livelli di ventilazione impostati.

Risultati

Per analizzare il primo obiettivo dello studio, ovvero la variazione della concentrazione di CO₂ in relazione al comportamento occupanti e all'utilizzo del sistema di ventilazione, la Figura 8 mostra l'andamento della concentrazione di CO₂ registrata il 21 marzo nell'aula MV_1, in relazione alla velocità del sistema di ventilazione e ai tempi di apertura di finestre e porta.

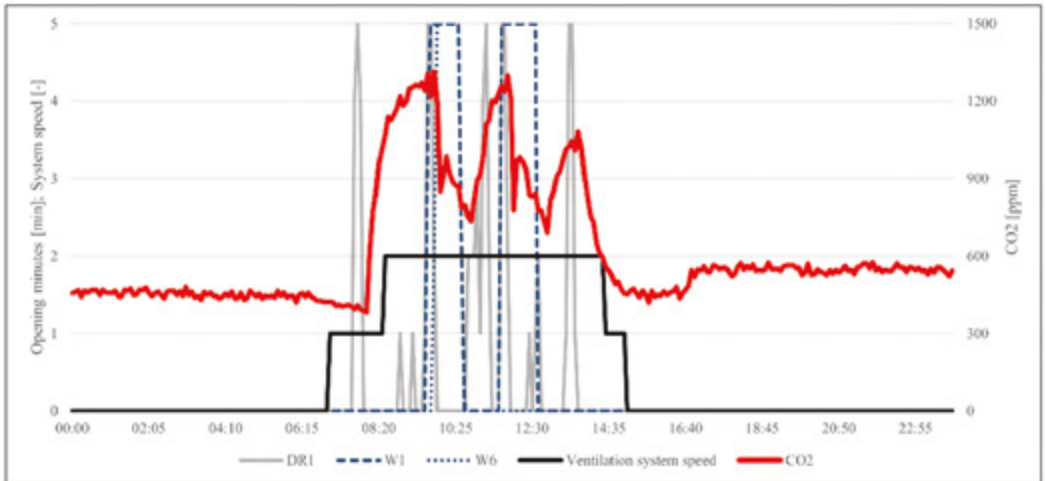


Figura 8. Aula MV_1 21/03/2023. Concentrazione di CO₂ in relazione ai minuti di apertura di finestre e porte e alla velocità del sistema di ventilazione meccanica.

Il posizionamento dei sensori su tutte le ante delle finestre ha consentito di individuare quali aperture venissero utilizzate più frequentemente dagli occupanti. La finestra più vicina alla cattedra (W1) è risultata la più utilizzata, probabilmente per la presenza dell'insegnante, seguita dalla finestra più distante (W6). Questo comportamento si è osservato in modo ricorrente durante l'intero periodo di monitoraggio; inoltre, tre delle sei ante disponibili non sono mai state aperte.

Il sistema di ventilazione meccanica viene attivato alle ore 7:00 alla velocità 1 e passa alla velocità 2 alle ore 8:30, dopo l'ingresso degli studenti. La velocità 2 viene mantenuta per tutta la durata delle attività scolastiche, mentre il sistema viene spento alle ore 15:00.

L'analisi dell'andamento della concentrazione di CO₂ evidenzia che:

- l'apertura delle finestre determina una riduzione significativa della concentrazione di CO₂;
- l'apertura della sola porta (DR1) non comporta una riduzione apprezzabile della concentrazione, ma è associata a un aumento dovuto all'ingresso degli occupanti.
- l'apertura contemporanea di porta e finestra (ad esempio tra le 9:30–9:40 o tra le 11:40–11:50) comporta una più rapida riduzione della CO₂, grazie alla formazione di ventilazione trasversale, favorita dalla posizione della porta sul lato opposto rispetto alle finestre.

La concentrazione di CO₂ è influenzata non solo dall'apertura delle finestre, ma anche dalla presenza del sistema di ventilazione. Quest'ultimo consente infatti di mantenere livelli di CO₂ inferiori rispetto a quelli ottenibili con la sola ventilazione naturale. Considerando il giorno più critico dell'intero periodo di monitoraggio, si registra una concentrazione media di CO₂ pari a 996 ppm e una massima di 1348 ppm. Il valore massimo rilevato risulta comunque inferiore al limite raccomandato dalla norma UNI EN 16798-1:2019 per gli edifici scolastici (1350 ppm).

Gli effetti del sistema di ventilazione risultano particolarmente evidenti al termine dell'orario scolastico, quando non si verificano aperture delle finestre e il decadimento della concentrazione di CO₂ è attribuibile esclusivamente alla ventilazione meccanica. In questa fase si osserva che, quando il sistema passa dalla velocità 2 alla velocità 1, il decadimento della CO₂ rallenta, fino ad arrestarsi completamente dopo lo spegnimento del sistema alle ore 15:00.

Per quanto riguarda il secondo obiettivo dello studio, ovvero confrontare i livelli di CO₂ in aule con ventilazione meccanica e aule senza ventilazione meccanica, possiamo osservare la Figura 9 che mostra l'andamento della concentrazione di CO₂ registrata il giorno 21/03 nelle aule MV_1, MV_2 e NV.

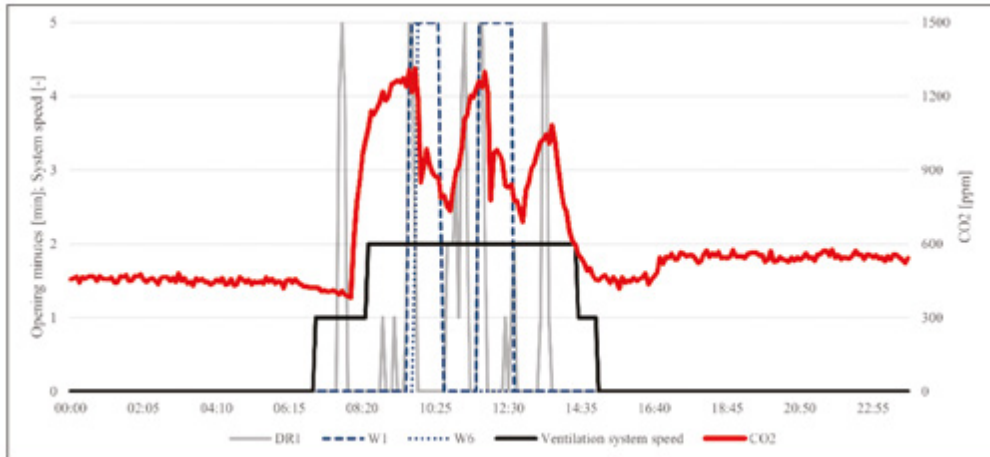


Figura 9. Concentrazione di CO₂ nelle tre aule oggetto dello studio durante la giornata del 21/03/2023 con identificazione per ciascuna aula del picco massimo di CO₂.

Osservando la Figura 9, l'influenza del sistema di ventilazione risulta chiaramente evidente.

- La concentrazione di CO₂ nell'aula NV, non dotata di sistema di ventilazione meccanica, risulta significativamente più elevata rispetto alle aule MV_1 e MV_2, nelle quali si registrano livelli di CO₂ più contenuti.
- Il valore massimo di CO₂ rilevato nell'aula NV è superiore del 45,3% rispetto a quello misurato nell'aula MV_1, mentre nell'aula MV_2 il valore massimo risulta inferiore del 7,9% rispetto all'aula MV_1.

Poiché le aule presentano lievi differenze in termini di volume e numero di occupanti, è stato introdotto un indice di normalizzazione al fine di rendere confrontabili i risultati. Tale indice è stato calcolato come rapporto tra il valore massimo di CO₂ registrato, il volume dell'aula e il numero di occupanti [ppm/persona • m³].

I valori ottenuti risultano pari a:

- 0,39 [ppm/persona • m³] per l'aula MV_1
- 0,38 [ppm/persona • m³] per l'aula MV_2 (inferiore dell'1,1% rispetto a MV_1)
- 0,63 [ppm/persona • m³] per l'aula NV (superiore del 62,8% rispetto a MV_1)

I risultati evidenziano come la ventilazione meccanica svolga un ruolo determinante nel garantire adeguate condizioni di qualità dell'aria interna, mentre la sola ventilazione naturale non risulta sufficiente a mantenere livelli di CO₂ contenuti. Nell'aula NV si osservano infatti riduzioni temporanee della concentrazione di CO₂ riconducibili all'apertura delle finestre. Tuttavia, durante il periodo invernale tale strategia risulta discontinua e limitata nel tempo, determinando un rapido incremento della concentrazione di CO₂ dopo la chiusura delle finestre, con valori che superano 1350 ppm, valore indicato come riferimento nella normativa tecnica per la valutazione della qualità dell'aria negli ambienti interni.



5. Qualità acustica degli ambienti interni scolastici. Rumore di impianto VMC: normativa, misura e soluzioni progettuali

- ▶ *Samantha Di Loreto, PhD - INGEO, Università G. d'Annunzio Chieti-Pescara*
- ▶ *Fabio Serpilli, PhD - DIISM, Università Politecnica delle Marche*
- ▶ *Valter Lori, PhD - DIISM, Università Politecnica delle Marche*
- ▶ *Sergio Montelpare - INGEO, Università G. d'Annunzio Chieti-Pescara*
- ▶ *Costanzo di Perna - DIISM, Università Politecnica delle Marche*

5.1 Quadro normativo di riferimento

5.1.1 Criteri Ambientali Minimi (CAM) — D.M. 23 giugno 2022

Il **D.M. 25 Novembre 2025** — *“Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi”* — costituisce il riferimento prestazionale obbligatorio per gli appalti pubblici ai sensi del D.Lgs. 50/2016.

Il criterio **2.3.10 Prestazioni e benessere** (comfort) acustico dispone esplicitamente che *“le scuole soddisfano almeno i valori di riferimento di requisiti acustici passivi e comfort acustico interno indicati nella UNI 11532-2”*, rendendo questa norma tecnica il riferimento cogente e vincolante per la progettazione e la verifica acustica degli edifici scolastici nell'ambito degli appalti pubblici.

5.1.2 Strumento normativo per la valutazione acustica: UNI 11532-2

La norma tecnica di riferimento esclusiva per la caratterizzazione, la progettazione e la misura in opera delle prestazioni acustiche interne negli edifici scolastici è la **UNI 11532-2** — *“Acustica in edilizia – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione – Parte 2: Settore scolastico”*.

La norma definisce le grandezze acustiche per la progettazione e si concentra specificamente sugli indicatori di comfort acustico negli ambienti didattici interni, identificando tre famiglie di indicatori:

- **Tempo di riverberazione ottimale (T_{ott})**
- **Indicatori di intelligibilità del parlato (STI e C50)**
- **Rumorosità degli impianti tecnici ($L_{ic,int}$ e curve NC)**

Nell'ambito del progetto necessARIA, la UNI 11532-2 è stata adottata come protocollo operativo per tutte le campagne di caratterizzazione acustica condotte negli istituti scolastici campione. La norma UNI 11532-2, per ciascuna delle grandezze acustiche di interesse, descrive in modo completo i metodi di verifica indicando postazioni di misura, procedure di misura e relazioni di calcolo comprensive della valutazione dell'incertezza estesa. Ad integrazione dei metodi di verifica descritti nella UNI 11532-2, per l'individuazione delle posizioni di sorgente e ricevitore nella misura del tempo di riverberazione si applica in modo complementare la **UNI EN ISO 3382-2**. Per la valutazione del rumore degli impianti si fa riferimento anche alle **UNI EN ISO 16032** e **UNI 8199** come ulteriori strumenti normativi di settore.

5.2. Indicatori acustici rilevanti per le aule scolastiche

5.2.1 Tempo di riverberazione ottimale (T_{ott})

La UNI 11532-2 definisce, per ogni categoria d'uso scolastica, un tempo di riverberazione ottimale T_{ott} che deve essere raggiunto affinché si abbia un comfort acustico adeguato alla funzione dell'ambiente. Il tempo di riverberazione ottimale T_{ott} deve essere calcolato sulla base delle caratteristiche geometriche dell'aula per uno stato di occupazione dell'ambiente dell'80%. La norma, a partire dal tempo di riverberazione ottimale T_{ott} calcolato permette di determinare un intervallo di conformità dipendente dalla frequenza. Le aule scolastiche ordinarie rientrano nella categoria **A3** della norma, per la quale vengono forniti suggerimenti integrati di progettazione geometrica, di arredo e di controllo del rumore residuo.

5.2.2 Intelligibilità del parlato: STI e C50

Lo **Speech Transmission Index (STI)** è l'indicatore principale per la valutazione oggettiva dell'intelligibilità del parlato, standardizzato nella norma **IEC 60268-16**. Quantifica l'effetto combinato dell'interferenza del rumore di fondo e della riverberazione sulla riduzione dell'intelligibilità del parlato. La UNI 11532-2 prevede in alternativa, per le categorie A3 con volumi inferiori a 250 m³, il descrittore **C50 (Clarity)**, definito come il rapporto tra l'energia sonora che giunge all'ascoltatore nei primi 50 ms e quella successiva. La UNI 11532-2 fornisce i valori di riferimento dei descrittori STI e C50 per ambienti con volumi inferiori a 250 m³ e del descrittore STI per ambienti di volume superiore a 250 m³. La norma **ISO 9921** costituisce riferimento complementare per la valutazione della qualità della comunicazione verbale.

5.2.3 Rumore degli impianti a funzionamento continuo: $L_{ic,int}$

La VMC rientra nella categoria normativa degli **impianti a funzionamento continuo** (impianti fissi il cui livello sonoro sia essenzialmente costante durante il funzionamento: impianti di riscaldamento, climatizzazione, ricambio d'aria).

Secondo la UNI 11532-2, il rumore da impianti continui è espresso dal descrittore **$L_{ic,int}$** (Livello di rumore corretto indotto dagli impianti a funzionamento continuo), accompagnato dalla verifica mediante **curve NC** (Noise Criteria). La norma UNI 11532-2 fornisce i valori di riferimento dei descrittori in relazione al volume dell'ambiente di installazione ed alla destinazione d'uso prevalente. I valori limite tabellati dalla norma si applicano agli impianti VMC in condizioni nominali di funzionamento, misurati secondo la procedura UNI.

Per gli **impianti a funzionamento discontinuo** (scarichi idraulici, ascensori, ecc.) la norma prevede i descrittori $L_{pu,max}$ e $L_{id,int}$ con valori limite tabulati separatamente.

5.3 Il rumore di impianto VMC: criticità e monitoraggio

5.3.1 Natura del problema

Il rumore prodotto dai sistemi VMC rappresenta una delle principali sorgenti di disturbo acustico negli ambienti scolastici, con effetti documentati sulla comprensione del parlato, sulla fatica cognitiva degli studenti e sullo stress vocale degli insegnanti. Il contributo acustico si manifesta attraverso due meccanismi principali:

- **Trasmissione aerea per via canalizzata:** il rumore generato dall'UTA si propaga attraverso la rete di distribuzione e viene irradiato negli ambienti attraverso le bocchette. La componente aerodinamica per flusso turbolento nelle curve e nei cambiamenti di sezione costituisce una sorgente secondaria distribuita lungo la rete.
- **Trasmissione strutturale:** le vibrazioni dell'unità vengono trasmesse alla struttura dell'edificio e rimesse come rumore aereo negli ambienti serviti. Questo meccanismo è critico nei sistemi con unità installate direttamente sulle pareti o sul solaio delle aule.

5.3.2 Evidenza dai monitoraggi del progetto necessARIA: aule senza VMC

Le campagne di misura hanno documentato che nelle scuole prive di impianti VMC, la qualità dell'aria è sistematicamente compromessa con concentrazioni di CO₂ ampiamente al di sopra della soglia nei periodi a porte e finestre chiuse.

Questa condizione ha indotto in diversi casi gli insegnanti a:

- aprire le finestre — con conseguente ingresso di rumore esterno — per compensare l'assenza di ventilazione meccanica efficace;

La soluzione al conflitto tra qualità dell'aria e comfort acustico non risiede nella rinuncia alla ventilazione, ma nella progettazione acustica integrata dell'impianto, come descritto nelle presenti linee guida.

5.4 Protocollo di misura in opera

5.4.1 Strumentazione

Misure acustiche oggettive

- **Sorgente omnidirezionale (dodecaedrica):** per l'eccitazione dell'ambiente nella misura del tempo di riverberazione T30.
- **Sorgente direzionale (TalkBox):** per la generazione del segnale normalizzato nella valutazione dello STI.
- **Fonometro analizzatore-integratore di Classe 1:** misura del livello equivalente ponderato A (L_{aeq,A}).
- **Microfono calibrato:** ricevitore nelle posizioni definite da UNI 11532-2 e UNI EN ISO 3382.
- **Calibratore acustico di Classe 1** per la calibrazione in campo della catena di misura.

Misure psicoacustiche binaurali

- **Testa binaurale:** acquisisce registrazioni binaurali simulando l'ascolto umano.
- **Acquisitore dati** dedicato alla testa binaurale.
- **Software post elaborazione.**

5.4.2 Procedura di misura secondo UNI 11532-2

Posizionamento. In relazione alla volumetria dell'ambiente vengono identificate le posizioni sorgente-ricevitore secondo la UNI 11532-2. Le distanze tra sorgente, ricevitore e superfici riflettenti sono definite dalla UNI EN ISO 3382. Per la misura del Lic,int, il microfono è posizionato a 1,5 m dal pavimento nelle posizioni di normale occupazione, a distanza ≥ 1 m dalle pareti e dalla bocchetta più vicina.

Condizioni operative. Le misure di T30, STI o C50 deve essere realizzate nella condizione di ambiente non occupato con tutte le sorgenti interne all'aula non attive. Le misure del Lic,int devono essere condotte con l'impianto VMC in funzione alla portata nominale, in assenza di altre sorgenti attive (occupanti, impianti di riscaldamento, traffico esterno con finestre chiuse).

Grandezze rilevate. Per ogni campagna si rilevano: T30 (bande di ottava 125 Hz–4 kHz), STI o C50 (per volumi < 250 m³ cat. A3), Lic,int con analisi spettrale in terzi di ottava (125 Hz–4 kHz) e verifica delle curve NC. L'analisi spettrale consente di identificare componenti tonali legate alla frequenza di pala dei ventilatori (BPF) che possono aggravare il disturbo soggettivo a parità di livello globale.

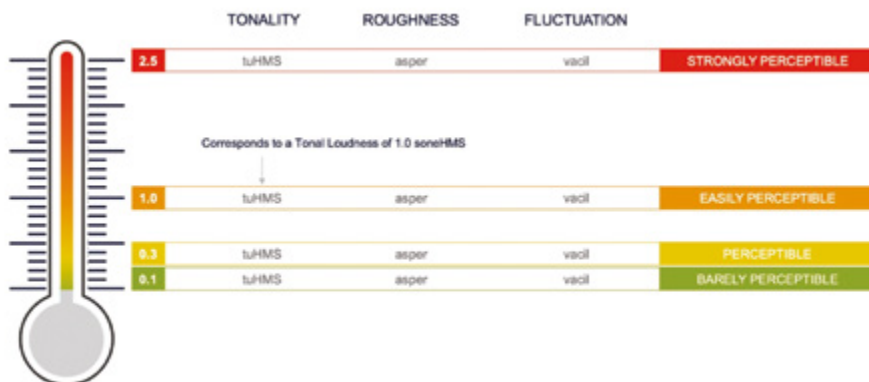
5.4.3 Valutazione psicoacustica e questionario soggettivo

La sola misura fisica non è sufficiente a descrivere la qualità acustica percepita dagli occupanti.

Il progetto necessARIA ha adottato un approccio multi-metodo che combina:

Analisi psicoacustica strumentale (Sottek Hearing Model ECMA 418-2)

Le registrazioni binaurali vengono elaborate con il Sottek Hearing Model, estraendo i seguenti parametri psicoacustici:



La Figura mostra il significato dei valori psicoacustici basati sul Hearing Model Sottek. Tutti i parametri sono stati sviluppati in modo tale che, ad esempio, un valore di “2.5” per tonality, roughness e fluctuation significhi una **percezione forte**, mentre un valore di “0.1” indica che la sensazione è **appena percepibile**.

Questionario soggettivo IEQ (UNI 10551 — ISO 12913)

Durante le campagne di misura viene somministrato agli occupanti un questionario IEQ articolato in 32 domande nelle seguenti categorie:

- caratteristiche dell’individuo;
- comfort termoisgrometrico;
- **comfort acustico**: qualità delle condizioni sonore percepita, intelligibilità del parlato dell’insegnante e degli studenti, quantità di rumore proveniente dall’esterno;
- comfort illuminotecnico.

5.5. Configurazioni impiantistiche

5.5.1 Architettura della soluzione Categoria I (vedi capitolo “Rating per le diverse soluzioni”)

La configurazione di riferimento si articola in tre elementi strutturali sinergici:

Elemento 1 — UTA delocalizzata con recuperatore a flussi incrociati

L’unità di trattamento aria deve essere collocata in un locale tecnico dedicato, esterno al corpo dell’edificio o separato dagli ambienti didattici da almeno due elementi strutturali. Il recuperatore di calore integrato deve essere di tipo a flussi incrociati (cross-flow), che garantisce:

- **Efficienza termica $\geq 75\%$** , confrontabile con i recuperatori a flussi contrapposti;
- **Assenza di contaminazione** tra flusso di aria esterna e aria espulsa (requisito igienico imprescindibile);
- **Contenuta resistenza aerodinamica** del nucleo scambiatore, con riduzione della prevalenza richiesta ai ventilatori e quindi del rumore generato.

I ventilatori devono essere selezionati con specifiche di bassa emissione sonora e dotati di antivibranti per disaccoppiare l’unità dalla struttura.

Elemento 2 — Rete di distribuzione canalizzata con attenuazione acustica integrata

La distribuzione dell'aria avviene esclusivamente attraverso reti di canalizzazioni, con i seguenti criteri:

- **Velocità dell'aria ≤ 4 m/s** nei canali principali, $\leq 2,5$ m/s nelle diramazioni terminali, per contenere il rumore autogenerato per turbolenza;
- **Silenziatori a setti fonoassorbenti** nelle tratte adiacenti all'unità centrale;
- **Raccordi e curve a profilo aerodinamico**, evitando cambi di direzione bruschi che generano rigenerazione di rumore;
- **Giunti correttamente sigillati** per evitare perdite e rumori di soffiaggio.

Elemento 3 — Controsoffitto acustico ($\alpha_w \geq 0,80$)

Il controsoffitto acustico svolge una duplice funzione di sistema:

- **Funzione di camera plenum per la distribuzione:** il vano tra solaio strutturale e controsoffitto ospita le canalizzazioni terminali e le bocchette, consentendo una disposizione razionale senza interferire con lo spazio didattico;
- **Funzione di attenuazione acustica:** i pannelli fonoassorbenti (lana minerale, fibra di poliestere o compositi) riducono il tempo di riverberazione e abbattano il rumore irradiato dalle bocchette. La combinazione plenum + controsoffitto consente attenuazioni supplementari dell'ordine di 5–8 dB(A) rispetto a installazioni a vista.

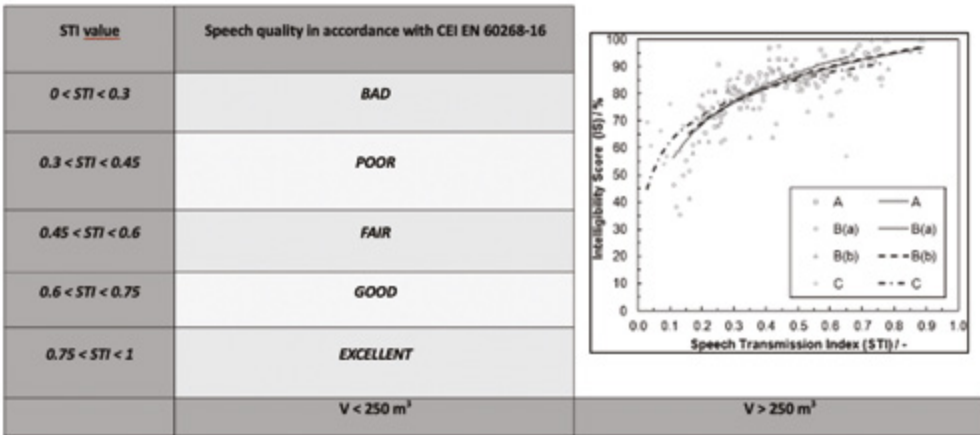
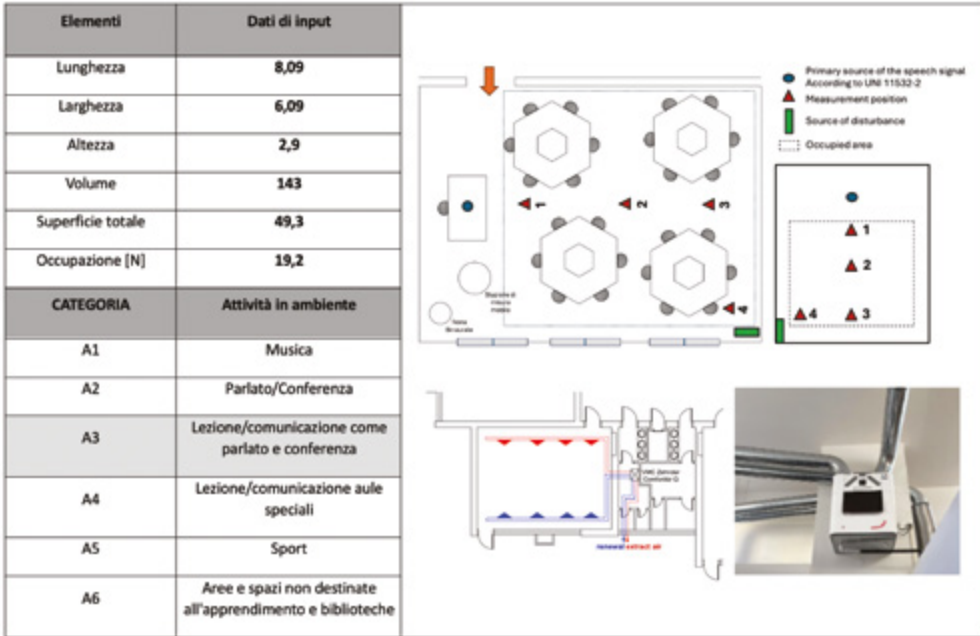




5.6 Casi studio

Lo studio ha coinvolto un numero elevato di aule scolastiche appartenenti a diversi complessi scolastici in diverse regioni di Italia. Per ciascuna aula sono state valutate le caratteristiche geometriche, la presenza e le eventuali caratteristiche di un trattamento acustico, la tipologia e le condizioni di funzionamento dell'impianto VMC presente.

5.6.1 Aula Falcone-Borsellino, Abruzzo, NERETO (TE)



Without amplification system	> 0.55 with source output at 1 m on axis equal to 60 dB (A)	> 0.50 with source output at 1 m on axis equal to 70 dB (A)
Without amplification system	> 0.60 with source output as in normal conditions of operation of the amplification system	

Incertezza standard	Incertezza estesa 84%	STI mean con incertezza IMPIANTO OFF	Rate intelligibility according to ISO 9921
[-]	[-]	[-]	
0,05	0,05	0,61	GOOD

Incertezza standard	Incertezza estesa 84%	STI mean con incertezza IMPIANTO ON	Rate intelligibility according to ISO 9921
[-]	[-]	[-]	
0,05	0,05	0,60	GOOD

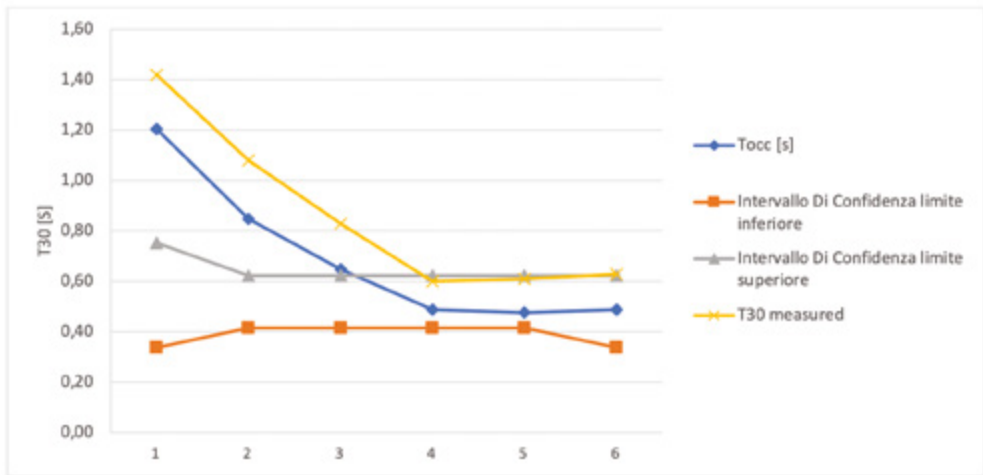


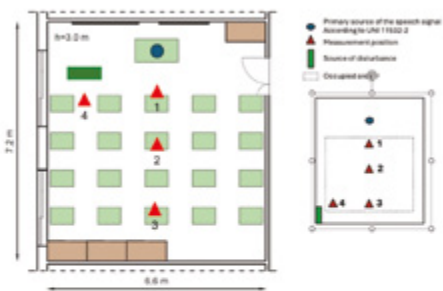

Tabella riassuntiva verifiche post-intervento:

Parametri	Valore	Limite norma	Note
Tocc	0.69 [s]	0.52	Non verificato¹
STI IMPIANTO OFF	0,61[-]	0.6 < STI < 0.75	Verificato
STI IMPIANTO ON	0,60[-]	0.6 < STI < 0.75	Verificato
Lamb	31.3 [dBA]	<= 38	Verificato
Lic,int	32.6 [dBA]	<= 34	Verificato

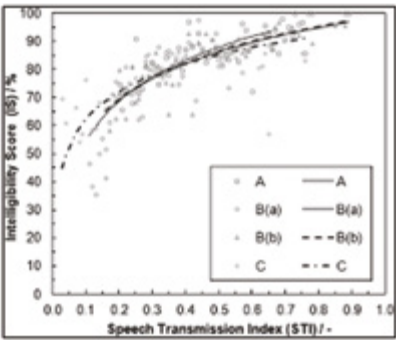
¹Il limite normativo è considerato per un'occupazione all'80%; per il calcolo si è considerata un'aula piena di 24 studenti. Data la modalità di gestione delle lezioni 'DADA', il valore di soglia potrebbe salire, pertanto non si ritiene preoccupante la non verifica del parametro.

5.6.2 Aula Scuola Primaria Quartiere Le Grazie, RECANATI (MC)

Elementi	Dati di input
Lunghezza	7,2
Larghezza	6,6
Altezza	2,97
Volume	141
Superficie totale	49,3
Occupazione [80%]	19,2
CATEGORIA	Attività in ambiente
A1	Musica
A2	Parlato/Conferenza
A3	Lezione/comunicazione come parlato e conferenza
A4	Lezione/comunicazione aule speciali
A5	Sport
A6	Aree e spazi non destinate all'apprendimento e biblioteche

STI value	Speech quality in accordance with CEI EN 60268-16	
$0 < STI < 0.3$	BAD	
$0.3 < STI < 0.45$	POOR	
$0.45 < STI < 0.6$	FAIR	
$0.6 < STI < 0.75$	GOOD	
$0.75 < STI < 1$	EXCELLENT	
	$V < 250 \text{ m}^3$	$V > 250 \text{ m}^3$
Without amplification system	> 0.55 with source output at 1 m on axis equal to 60 dB (A)	> 0.50 with source output at 1 m on axis equal to 70 dB (A)
With amplification system	> 0.60 with source output as in normal conditions of operation of the amplification system	



Incertezza standard	Incertezza estesa 84%	STI mean con incertezza IMPIANTO OFF	Rate intelligibility according to ISO 9921
[-]	[-]	[-]	
0,05	0,05	0,67	GOOD

Incertezza standard	Incertezza estesa 84%	STI mean con incertezza IMPIANTO ON	Rate intelligibility according to ISO 9921
[-]	[-]	[-]	
0,05	0,05	0,66	GOOD

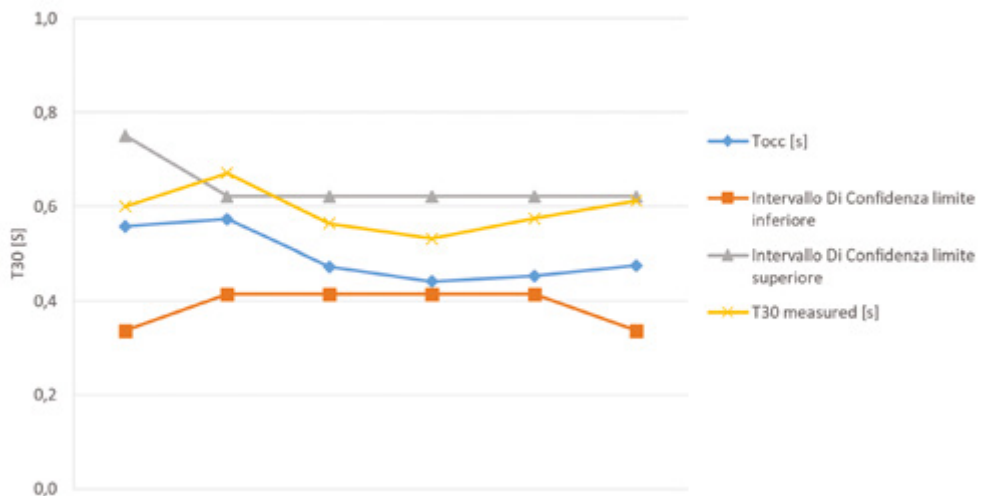
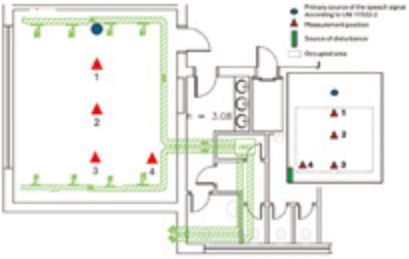


Tabella riassuntiva verifiche post-intervento:

Parametri	Valore	Limite norma	Note
Tocc	/	0.52	Verificato
STI IMPIANTO OFF	0,62[-]	$0.6 < STI < 0.75$	Verificato
STI IMPIANTO ON	0,61[-]	$0.6 < STI < 0.75$	Verificato
Lic,int	33.1 [dBA]	≤ 34	Verificato

5.6.3 Aula 5 Scuola Primaria M.L. King, BOLZANO (BZ)

Elementi	Dati di input
Lunghezza	5,9
Larghezza	7
Altezza	3
Volume	125
Superficie totale	41,7
Occupazione [80%]	16
CATEGORIA	Attività in ambiente
A1	Musica
A2	Parlato/Conferenza
A3	Lezione/comunicazione come parlato e conferenza
A4	Lezione/comunicazione aule speciali
A5	Sport
A6	Aree e spazi non destinate all'apprendimento e biblioteche




Primary source of the speech signal

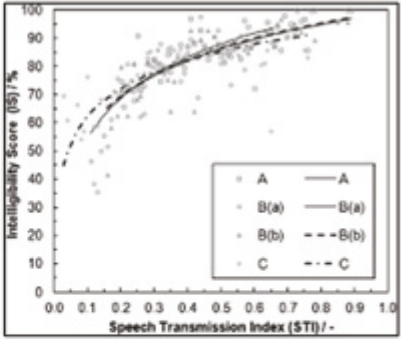
Measurement position

Source of disturbance

Occupation



STI value	Speech quality in accordance with CEI EN 60268-16	
$0 < STI < 0.3$	BAD	
$0.3 < STI < 0.45$	POOR	
$0.45 < STI < 0.6$	FAIR	
$0.6 < STI < 0.75$	GOOD	
$0.75 < STI < 1$	EXCELLENT	
	$V < 250 \text{ m}^3$	$V > 250 \text{ m}^3$
<u>Without amplification system</u>	> 0.55 with source output at 1 m on axis equal to 60 dB (A)	> 0.50 with source output at 1 m on axis equal to 70 dB (A)
<u>With amplification system</u>	> 0.60 with source output as in normal conditions of operation of the amplification system	



Incertezza standard	Incertezza estesa 84%	STI mean con incertezza IMPIANTO OFF	Rate intelligibility according to ISO 9921
[-]	[-]	[-]	
0,05	0,05	0,63	GOOD

Incertezza standard	Incertezza estesa 84%	STI mean con incertezza IMPIANTO ON	Rate intelligibility according to ISO 9921
[-]	[-]	[-]	
0,05	0,05	0,62	GOOD

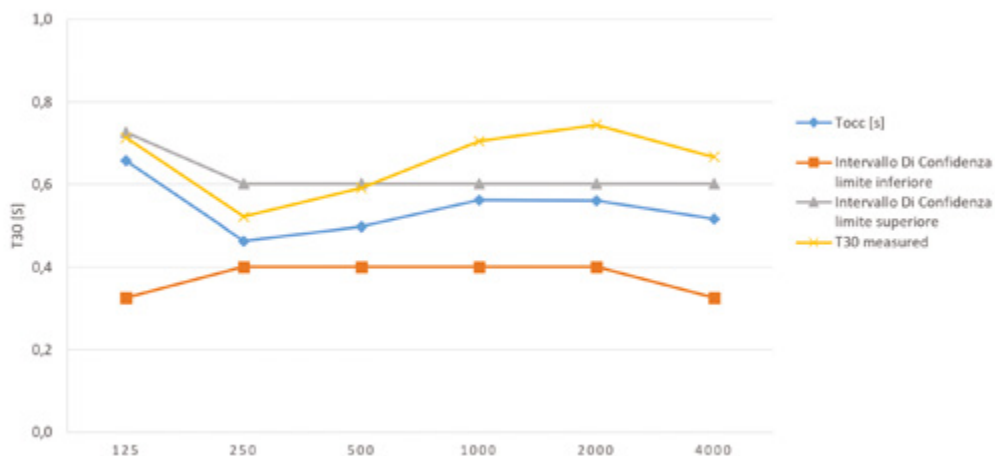
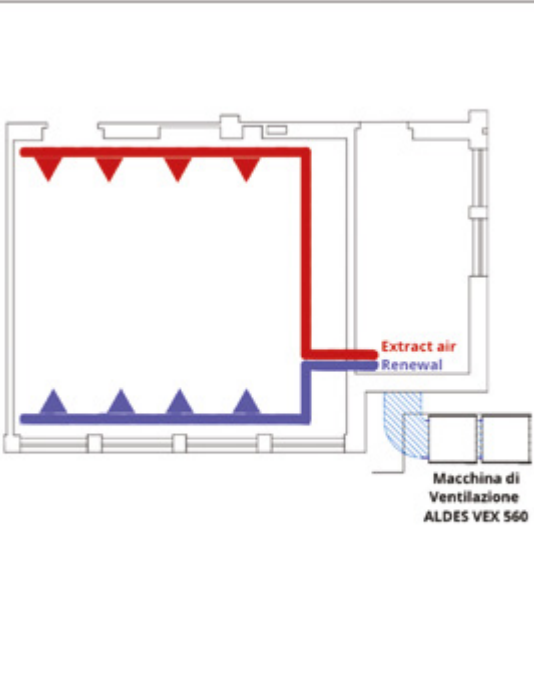


Tabella riassuntiva verifiche post-intervento:

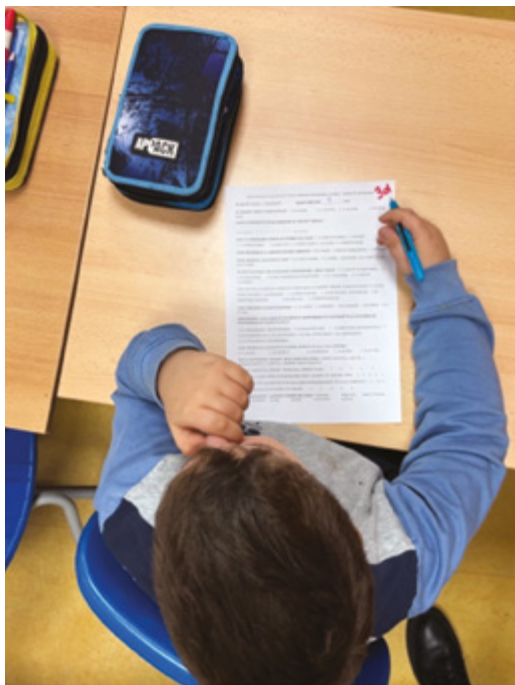
Parametri	Valore	Limite norma	Note
Tocc	/	0.50	Verificato
STI IMPIANTO OFF	0,58[-]	0.6 < STI < 0.75	Verificato
STI IMPIANTO ON	0,57[-]	0.6 < STI < 0.75	Verificato
Lic,int	34 [dBA]	<= 34	Verificato

5.6.4 Aula 1c Scuola Manzoni, BOLZANO (BZ)

Elementi	Dati di input
Lunghezza	5
Larghezza	5,3
Altezza	2,7
Volume	72
Superficie totale	26,5
Occupazione [N]	25
CATEGORIA	Attività in ambiente
A1	Musica
A2	Parlato/Conferenza
A3	Lezione/comunicazione come parlato e conferenza
A4	Lezione/comunicazione aule speciali
A5	Sport
A6	Aree e spazi non destinate all'apprendimento e biblioteche



Caratterizzazione psicoacustica e somministrazione dei questionari soggettivi in accordo con ISO/TS 12913-2:



La raccolta dei dati soggettivi è avvenuta tramite somministrazione individuale di un questionario adattato all'età dei partecipanti (8-9 anni). Di seguito si riporta lo stralcio di questionario somministrato ai bambini in classe:



QUESTIONARIO IEQ SCUOLE - Progetto NecessARIA

La finalità del questionario è la determinazione del comfort degli occupanti all'interno delle aule scolastiche (in accordo con la normativa UNI16795).

Si raccomanda di rispondere alle domande tenendo conto di ciò che si percepisce al momento della compilazione del questionario. Il questionario è anonimo ed è importante che venga compilato in maniera autonoma, in quanto rappresenta una percezione del tutto soggettiva sulla qualità ambientale. Il questionario è stato approvato nell'ambito del progetto NecessARIA (<https://www.necessaria.it>).

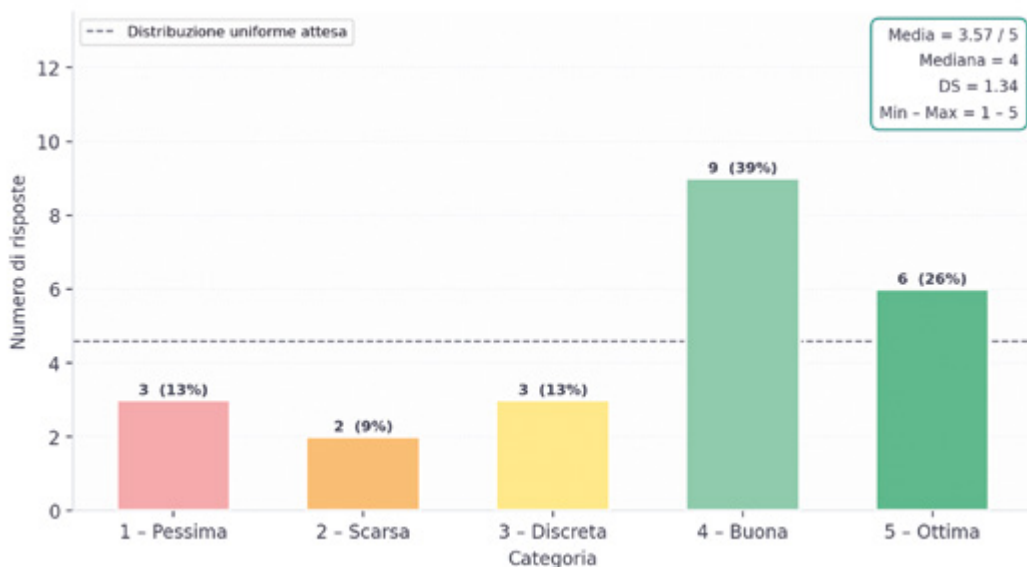
Grazie della collaborazione.

Comfort acustico
Domande riguardanti il grado di soddisfazione di un individuo riguardo la percezione acustica nell'ambiente in cui si trova.

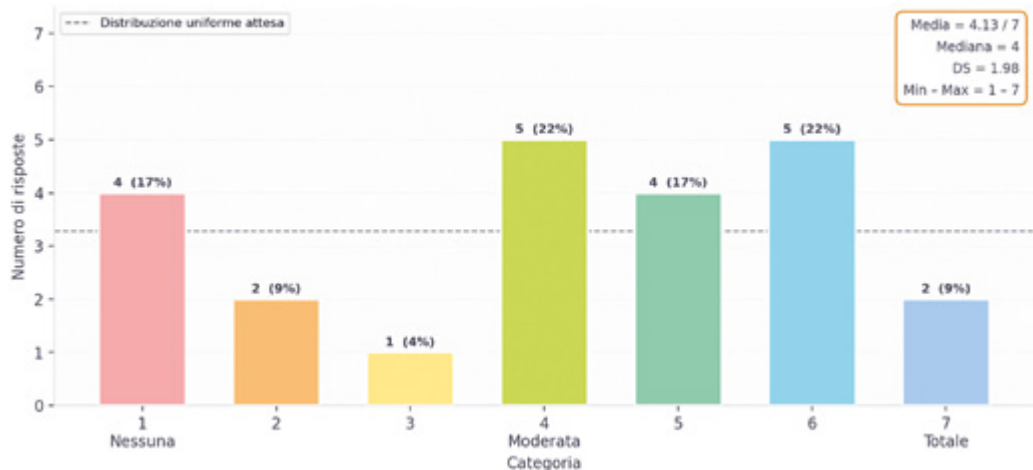
Come percepisce la qualità delle condizioni sonore? *

- (1) Scarsa
- (2) Discreta
- (3) Mediocra
- (4) Buona
- (5) Ottima

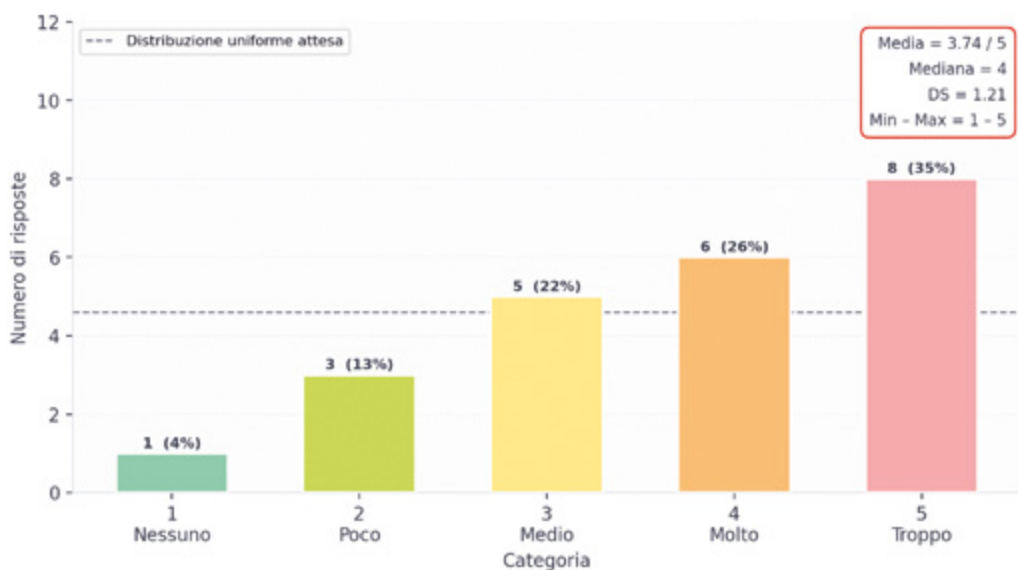
La qualità acustica generale è percepita in modo tendenzialmente positivo (media 3.57/5, mediana=4), ma con variabilità elevata: una minoranza consistente dà punteggi molto bassi, il che suggerisce un'esperienza acustica non uniforme tra gli alunni.



L'intelligibilità del parlato è la dimensione più variabile ($DS \approx 1.98$ su scala 1-7): alcuni bambini capiscono benissimo, altri quasi niente - un classico segnale di rapporto segnale-rumore insufficiente in almeno una parte dell'aula.

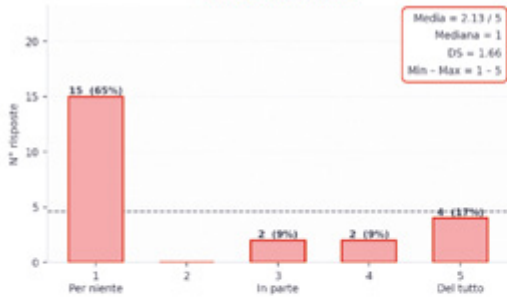


La quantità di rumore è percepita come alta: il 35% assegna il massimo (5/5), coerente con un'aula senza trattamento fonoassorbente.

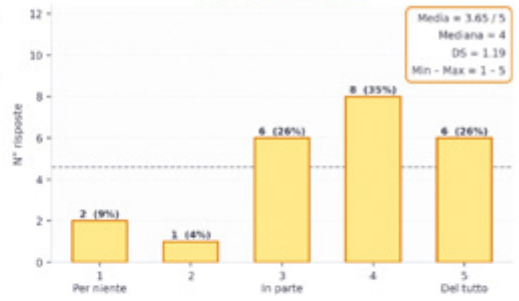


Nella distinzione dei suoni, emerge chiaramente una gerarchia: i suoni progettati (campana, filodiffusione, ecc.) sono i più riconoscibili (media 4.35/5, DS minima), mentre rumore ambientale ed effetto acustico sono scarsamente distinti dai bambini (medie 2.13 e 1.87).

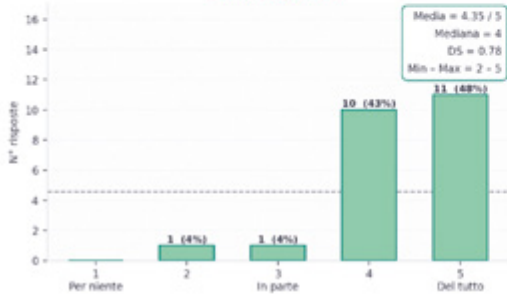
Rumore Ambientale



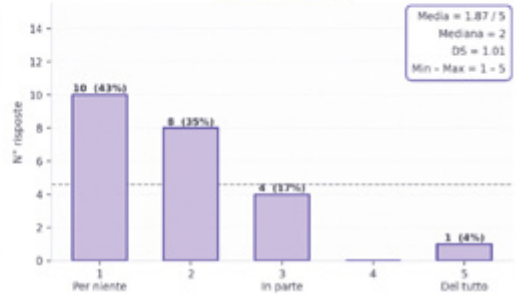
Suoni da Esseri Umani



Suoni Progettati



Effetto Acustico



6. Le installazioni e i monitoraggi delle scuole del progetto necessARIA

- ▶ *Giuseppina Caggiano - Università degli Studi di Bari Aldo Moro*
- ▶ *Samantha Di Loreto - Università G. d'Annunzio di Chieti Pescara*
- ▶ *Costanzo Di Perna - Università Politecnica delle Marche*
- ▶ *Gianmaria Fulci - Provincia autonoma di Bolzano*
- ▶ *Marco Lopuzzo - Università degli Studi di Bari Aldo Moro*
- ▶ *Sergio Montepare - Università G. d'Annunzio di Chieti Pescara*
- ▶ *Clara Peretti - Consulente Provincia autonoma di Bolzano*
- ▶ *Roberta Rizzone - Regione Abruzzo*
- ▶ *Valeria Rossi - Regione Abruzzo*
- ▶ *Francesco Triggiano - Università degli Studi di Bari Aldo Moro*
- ▶ *Luca Verdi - Provincia autonoma di Bolzano*

Il progetto PNRR- PNC necessARIA mira ad analizzare il tema della qualità dell'aria nelle scuole italiane, attraverso la valutazione di possibili soluzioni tecniche e tecnologiche, da testare in casi pilota. Tra le soluzioni analizzate vi sono l'apertura manuale delle finestre e sistemi di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC). Un corretto ricambio dell'aria interna migliora la qualità dell'aria (IAQ), contribuendo anche alla diminuzione di un'eventuale presenza di aerosol a rischio infettivo e, grazie alla presenza di uno scambiatore di calore contribuisce alla riduzione dei consumi energetici. Tra gli obiettivi del progetto vi è l'installazione, monitoraggio e analisi di installazioni pilota in centro nord e sud Italia. Per le installazioni è stato prodotto un modello di bando di gara che prevede specifiche caratteristiche dei sistemi di ricambio dell'aria, tra queste l'installazione della macchina di ventilazione (VMC) fuori dall'aula e l'installazione di un sistema di distribuzione efficace che permetta un ricambio d'aria in tutta l'aula.

6.1 Il modello di bando di gara

Al fine di rendere ripetibili le installazioni delle VMC è stato predisposto un modello di bando di gara con requisiti tecnici e di installazione specifici. I criteri sui sistemi di gestione, monitoraggio e regolazione delle VMC sono stati classificati come "criteri premianti". Sono di seguito elencate le caratteristiche dei sistemi VMC inserite nel modello di bando di gara che è stato applicato a dieci scuole nelle tre Unità Operative coinvolte, in un totale di 35 ambienti scolastici.

Requisiti tecnici

- Una macchina VMC (Ventilazione Meccanica Controllata) a servizio di una, due aule (o più): in caso di più aule, queste dovranno avere lo stesso orientamento
- Portata di ventilazione: applicazione dei Criteri Ambientali Minimi - norma UNI EN 16798-1. La portata deve essere garantita con la prevalenza necessaria a ventilare l'aula
- Posizione della macchina: in corridoio oppure locali tecnici (antibagno/sgabuzzini/..)
- Espulsione: in direzione diversa dall'immissione oppure almeno ad una distanza limite definita dal produttore
- Canalizzazione di distribuzione e prelievo in aula: evitare il bypass dei flussi, rispettare i requisiti acustici
- Al fine di assicurare il benessere acustico e un regolare svolgimento delle lezioni, devono essere installati impianti a bassa rumorosità, che garantiscano l'accettabilità del rumore prodotto dall'impianto, in conformità alle norme tecniche e alla legislazione sul tema della rumorosità degli impianti
- Sistema di monitoraggio e di regolazione: criteri premianti dettagliati di seguito
- Collegamenti elettrici funzionali all'installazione.

Regolazione: tali criteri sono stati considerati come premianti nella valutazione.

- Sistema predisposto per integrazione e gestione sulle logiche di regolazione e di controllo
- Collegamento macchina – sistema di regolazione: bus (mediante cavo)
- Protocollo Modbus oppure altro protocollo
- Possibilità di accensione e spegnimento manuale per settimane di vacanza
- Regolazione della portata
- Pannello in aula (collegato in bus con la macchina oppure altro senza filo): regolazione mediante livelli di funzionamento.



6.2 Le 35 installazioni del progetto necessARIA

All'interno del progetto necessARIA sono stati installati sistemi VMC innovativi nelle seguenti Regioni/Province Autonome, descritte in Tabella 1.

	Dettagli sull'installazione	Numero scuole coinvolte
VMC in Provincia di Bolzano	Due tipologie di installazione. In una scuola VMC installate nei bagni o altri locali accessori e canalizzate verso le aule. Nella seconda scuola VMC centralizzata installata all'esterno a servizio di 4 aule e una mensa	2
VMC in Abruzzo	VMC installate nei bagni o altri locali accessori e canalizzate verso le aule	4
VMC in Puglia	VMC installate a soffitto nei corridoi e canalizzate verso le aule	5

Tabella 4. Installazione delle VMC del progetto necessARIA

Le undici scuole sono state scelte per essere rappresentative delle tipologie edilizie e dell'affollamento delle scuole delle Regioni e Prov. Autonome coinvolte, oltre che rappresentare, dal punto di vista geografico, una distribuzione rappresentativa delle differenti condizioni meteorologiche stagionali medie delle aree regionali italiane.

Nelle Figure di seguito sono rappresentate alcune delle diverse installazioni dei sistemi VMC. Le diverse configurazioni (tipologia di macchina VMC, portate, tipologie di sistema di distribuzione dell'aria, dimensioni e orientamento delle aule) saranno analizzate nel corso dell'anno scolastico 2025-2026, sia in termini di IAQ, comfort e consumi che di salute degli occupanti mediante la somministrazione di un questionario.

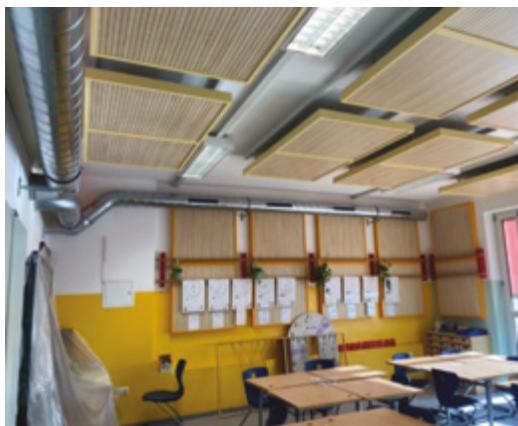


Figura 10. Sistema di distribuzione in aula (a sinistra) e VMC installata nel bagno (a destra). Una macchina dedicata ad ogni aula. Scuola primaria di Bolzano



Figura 11. Sistema di distribuzione in aula (a sinistra) e VMC installata all'esterno (a destra). La macchina è dedicata a quattro aule e una mensa. Scuola primaria di Bolzano



Figura 12. Sistema di distribuzione in aula (a sinistra) e VMC installata nel bagno (a destra). Una macchina dedicata ad ogni aula. Scuola primaria in Abruzzo



Figura 13. Sistema di distribuzione in aula (a sinistra) e VMC installata nel corridoio (a destra). Una macchina dedicata ad ogni aula. Scuola secondaria di secondo grado di Bari

Attraverso le installazioni è stato possibile valutare le **strategie da mettere in atto per le procedure**, il coinvolgimento delle scuole, le installazioni e la gestione complessiva di edifici scolastici esistenti. Queste sono riassunte di seguito.

1. Procedure e affidamenti: le scuole sono di proprietà di Comuni, Province e Regioni in funzione del grado scolastico. Tale aspetto implica la necessità di coinvolgere molteplici figure sia scolastiche (dirigenti, insegnanti) sia amministrative (settore impianti e manutenzione).
2. Progettazione: l'installazione delle VMC in edifici esistenti necessita di una dettagliata progettazione preliminare, definitiva e esecutiva. Questa fondamentale fase evita durante l'installazione di trovare criticità che potrebbero allungare il periodo di installazione o comunque penalizzare l'efficacia dell'intervento.
3. Progettazione acustica: un'attenta progettazione acustica deve essere realizzata al fine di evitare di peggiorare le prestazioni acustiche della scuola. Gli impianti centralizzati a servizio di più aule possono peggiorare l'acustica tra i diversi ambienti, è quindi fondamentale valutare attentamente le connessioni verticali e orizzontali dei diversi ambienti per il passaggio delle tubazioni, ricorrendo se necessario a delle soluzioni mirate, come per es. dei silenziatori.
4. Installazioni: le attività di installazione sono molto impattanti, in termini di rumore, polvere prodotta durante il cantiere e di impatto estetico delle canalizzazioni. Un'attività preliminare di sensibilizzazione e informazione verso il personale scolastico è necessaria per ridurre le criticità durante le fasi di installazione.
5. Attività di pulizia post installazione: i costi per la pulizia finale devono essere computati al fine di valutare correttamente le spese complessive.
6. Coinvolgimento del personale scolastico: dopo l'installazione le analisi e i monitoraggi aiutano a coinvolgere le scuole sulle attività in corso.
7. Protezione delle tubazioni: in caso di installazione di tubazioni verticali che possono essere in contatto con gli alunni deve essere prevista una protezione aggiuntiva.

6.3 I risultati dei monitoraggi nelle scuole del progetto necessARIA

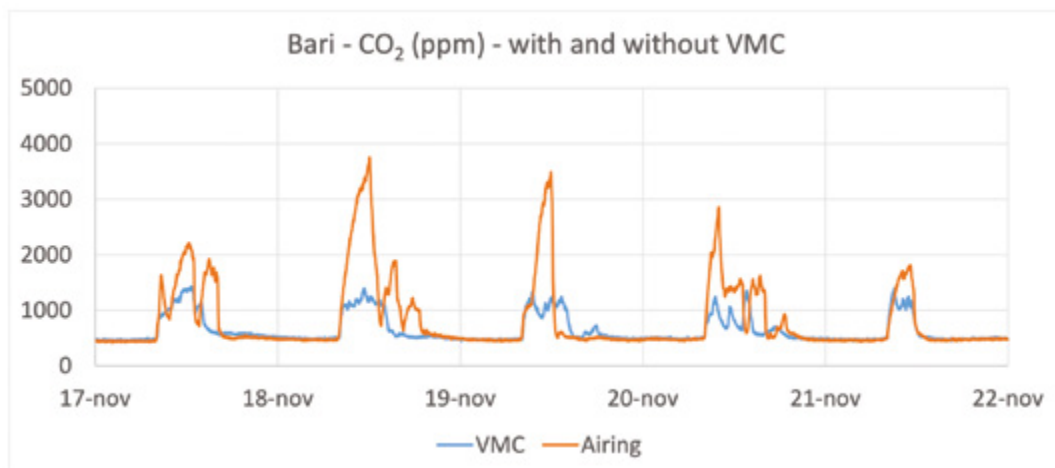


Figura 1 – Concentrazione di CO₂ (ppm) durante una settimana scolastica. Confronto tra un'aula dotata di sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC) e un'aula ventilata manualmente (apertura manuale delle finestre) a Bari

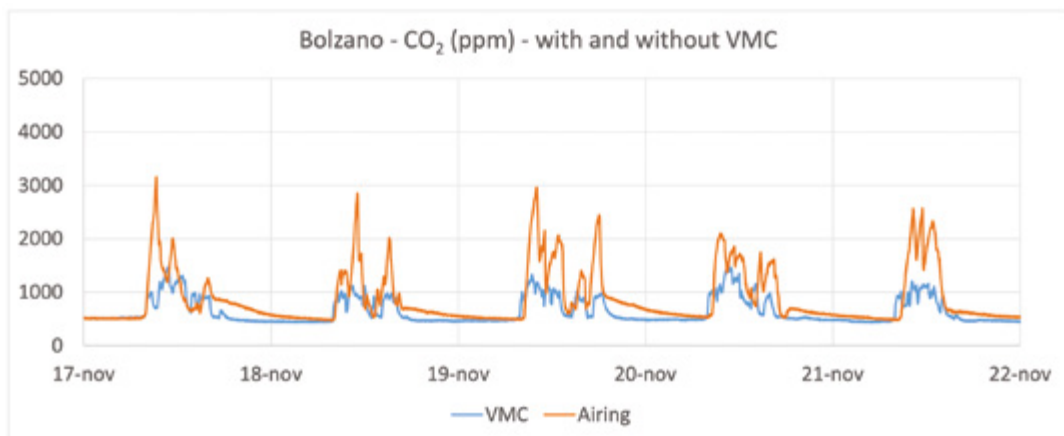


Figura 2 – Concentrazione di CO₂ (ppm) durante una settimana scolastica. Confronto tra un'aula dotata di sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC) e un'aula ventilata manualmente (apertura manuale delle finestre) a Bolzano

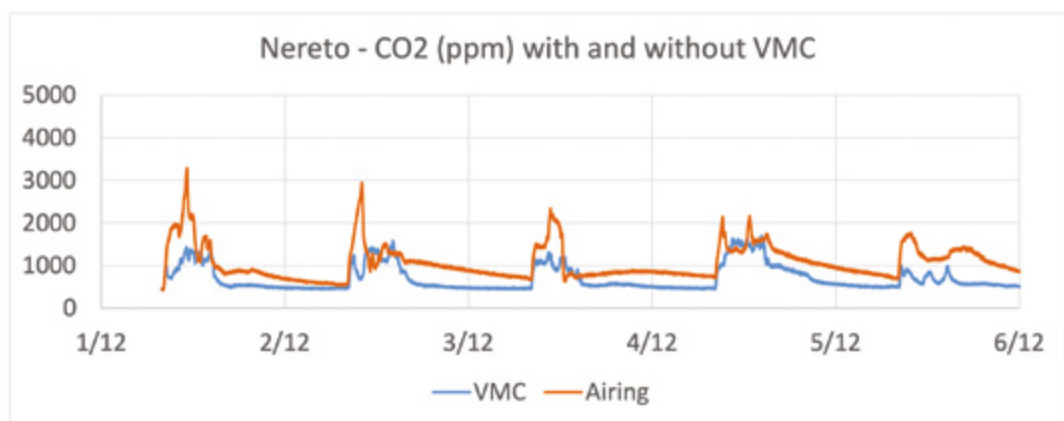


Figure 3 – Concentrazione di CO₂ (ppm) durante una settimana scolastica. Confronto tra un'aula dotata di sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC) e un'aula ventilata manualmente (apertura manuale delle finestre) a Nereto (Teramo, TE)

Per confrontare le prestazioni dei sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) con quelle delle aule non dotate di tali sistemi, sono state selezionate le ore di occupazione (dalle 8:00 alle 13:00) e, per tali ore, sono state determinate le categorie previste dalla norma UNI EN 16798-1.

La EN 16798-1:2019 definisce quattro categorie di qualità dell'aria interna (IAQ) per occupanti non adattati, sulla base dell'incremento di concentrazione di CO₂ rispetto all'aria esterna (Tabella B.9). Le categorie assumono un'emissione standard di CO₂ pari a 20 L/(h per persona):

- Categoria I (Alta qualità): ≤ 550 ppm di CO₂ aggiuntiva
- Categoria II (Qualità media): 550–800 ppm di CO₂ aggiuntiva
- Categoria III (Qualità moderata): 800–1350 ppm di CO₂ aggiuntiva
- Categoria IV (Bassa qualità): > 1350 ppm di CO₂ aggiuntiva

Per le scuole e per altre destinazioni sensibili (ospedali, strutture sanitarie, asili nido), la Categoria II è il livello raccomandato. Questo corrisponde a una concentrazione di CO₂ esterna tipica di circa 450 ppm, cui si aggiunge un massimo di 800 ppm, per un valore assoluto in ambiente interno che non dovrebbe superare approssimativamente 1250 ppm in condizioni di riferimento standard.

I risultati sono riassunti negli istogrammi riportati nelle Figure di seguito.

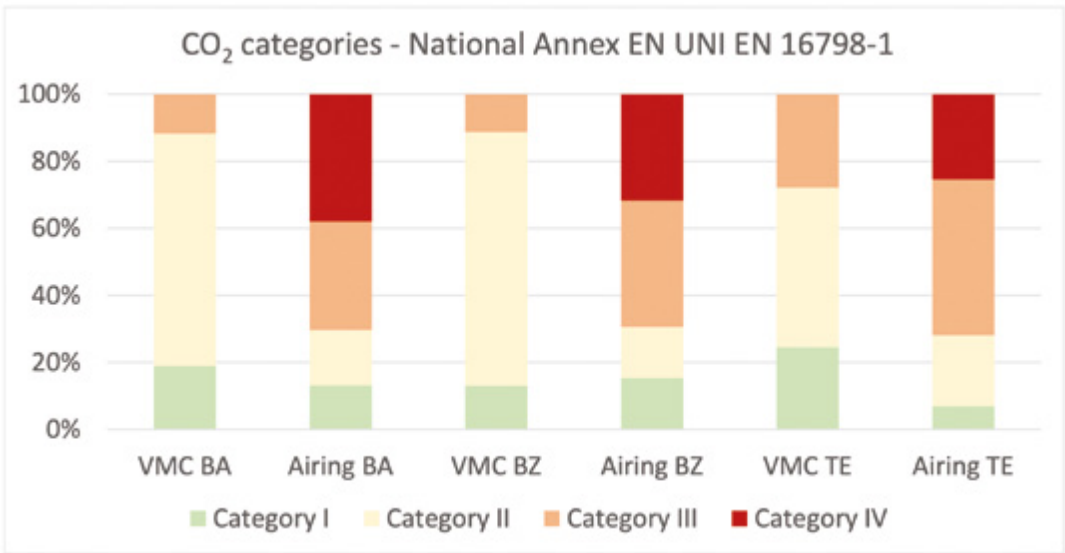


Figure 4 – Categorie della UNI EN 16798-1 per la CO₂

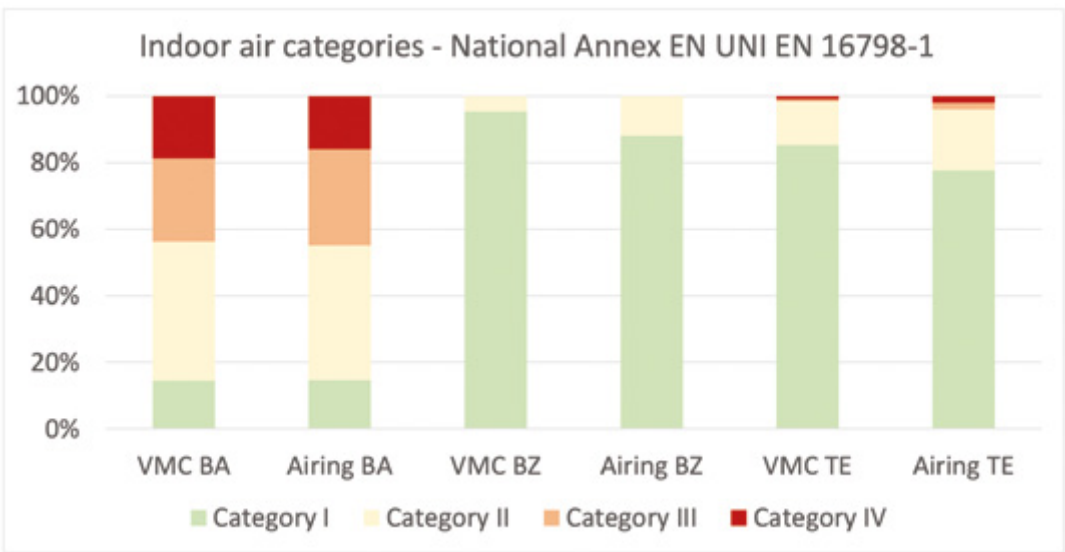


Figure 5 – Categorie della UNI EN 16798-1 per la temperatura dell'aria

Nel confronto tra ventilazione meccanica controllata (VMC) e apertura delle finestre, il beneficio più evidente riguarda la qualità dell'aria interna in termini di CO₂, mentre l'effetto sulla temperatura dipende maggiormente dal clima locale e dalle modalità di regolazione dei sistemi di emissione. A Bolzano, la ventilazione meccanica (VMC) comporta un netto miglioramento dei livelli di CO₂ rispetto alla sola aerazione. Con l'apertura delle finestre, le aule trascorrono la maggior parte del tempo di occupazione nelle Categorie III e IV, il che significa che le concentrazioni di CO₂ superano spesso gli intervalli raccomandati. Quando si utilizza la VMC, il tempo nelle categorie peggiori (III-IV) si riduce drasticamente e la distribuzione si sposta verso le Categorie I e II, indicando una qualità dell'aria costantemente migliore. Per quanto riguarda la temperatura interna, entrambe le strategie offrono già prestazioni molto buone: con la sola aerazione, quasi tutto il tempo ricade nelle Categorie I e II, e la VMC aumenta solo leggermente la quota di tempo

in Categoria I. Ciò suggerisce che a Bolzano il contesto edificio-clima consente un buon comfort termico anche con la sola apertura delle finestre, mentre la VMC apporta soprattutto un valore aggiunto sul fronte della CO₂. Considerato che la VMC, nonostante il recupero di calore, tende comunque a ridurre le temperature interne, la differenza va ricercata nelle diverse configurazioni degli impianti (numero di radiatori, distanza dal generatore) e delle aule (superfici disperdenti, orientamento).

A Bari, il contrasto tra aerazione e VMC è molto marcato per quanto riguarda la CO₂. Con la sola apertura delle finestre, le aule trascorrono una quota rilevante di tempo nelle Categorie III e IV, segnalando una ventilazione insufficiente e frequenti superamenti dei limiti di CO₂. Con l'introduzione della VMC, la distribuzione si inverte: la maggior parte del tempo si colloca nelle Categorie I e II e le condizioni di Categoria IV vengono praticamente eliminate. Ciò dimostra che, in questo contesto, la VMC è fondamentale per raggiungere classi accettabili di qualità dell'aria interna. Per la temperatura, invece, la differenza tra aerazione e VMC è limitata. In entrambi i casi il tempo è distribuito su tutte e quattro le categorie, con solo circa metà del tempo in Categorie I e II e una quota significativa in III e IV. Questo indica che il disagio termico a Bari è influenzato più dal clima e dalla progettazione edilizia/impiantistica che dal solo tipo di ventilazione, e che la VMC, di per sé, non risolve completamente i problemi di comfort termico.

A Nereto, con la sola aerazione, la maggior parte del tempo è trascorsa nelle Categorie III e IV, a testimonianza di un ricambio d'aria insufficiente. Con la VMC, la Categoria IV scompare quasi del tutto e il tempo viene redistribuito principalmente nelle Categorie II e III, con un certo incremento della Categoria I. Per la temperatura interna, sia l'aerazione naturale sia la VMC offrono nel complesso buone prestazioni: nella maggior parte del tempo le condizioni ricadono nelle Categorie I e II in entrambi i casi, e la VMC riduce solo leggermente la già bassa incidenza delle Categorie III e IV. Come a Bolzano, questo indica che l'edificio e il clima locale consentono un buon comfort termico con la semplice apertura delle finestre, mentre la VMC apporta un beneficio aggiuntivo modesto sulla temperatura ma più rilevante sul controllo della CO₂.

Sono state definite e testate soluzioni replicabili di ventilazione meccanica controllata (VMC) in 35 aule scolastiche in tre diversi contesti climatici italiani, supportandole con un capitolato-tipo standard. L'analisi comparativa **tra aule dotate di VMC e aule che si affidano esclusivamente all'apertura manuale delle finestre** mostra un miglioramento netto e sistematico della qualità dell'aria interna in termini di concentrazioni di CO₂. In tutte e tre le scuole di caso studio, la VMC aumenta in modo significativo la quota di tempo nelle Categorie I-II della UNI EN 16798-1 e quasi azzerava la Categoria IV, che con la sola aerazione può arrivare fino al 60% delle ore di occupazione. Per la temperatura dell'aria interna, la differenza tra VMC e aerazione è meno marcata e fortemente condizionata dal contesto locale.

Questi risultati evidenziano che la VMC è uno **strumento fondamentale per garantire una qualità dell'aria adeguata nelle scuole**, ma deve essere integrata con un'attenta progettazione dell'involucro edilizio, dell'impianto di riscaldamento e delle strategie di regolazione.

6.3.1. Focus monitoraggio delle scuole della Provincia autonoma di Bolzano

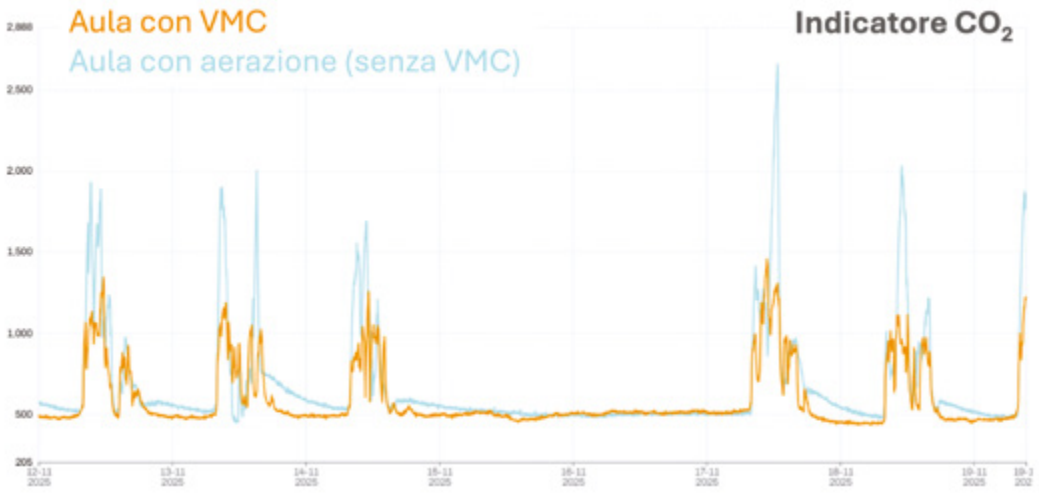


Figura 14. CO₂ in aula con e senza VMC. Scuola primaria

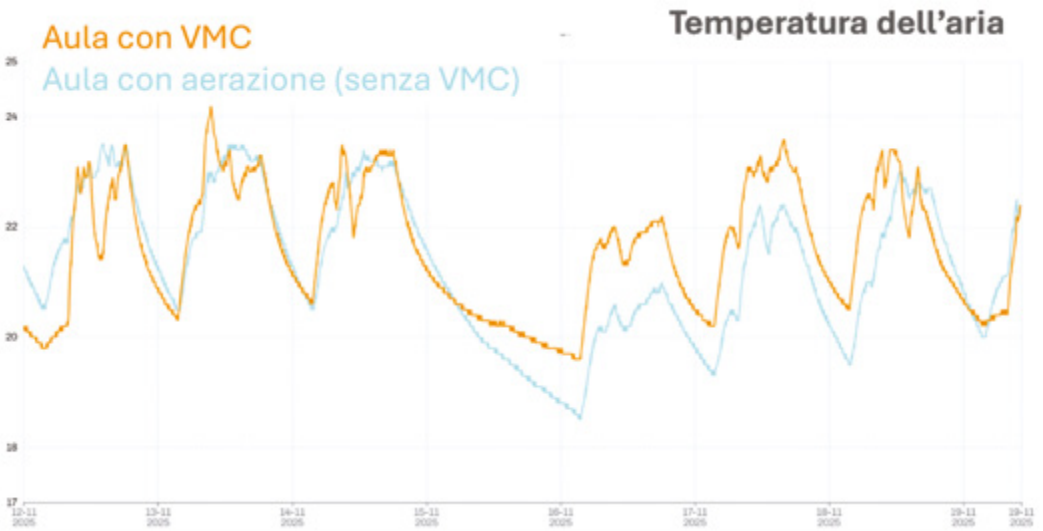


Figura 15. Temperatura dell'aria in aula con e senza VMC. Scuola primaria

6.3.2 Focus monitoraggio delle scuole di Bari



Figura 16. CO₂ in aula con e senza VMC. Istituto tecnico

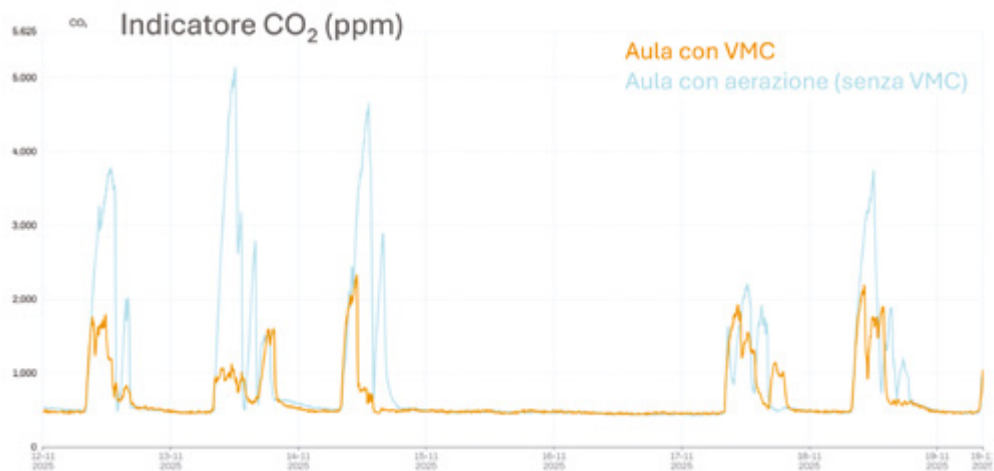


Figura 17. CO₂ in aula con e senza VMC. Scuola primaria

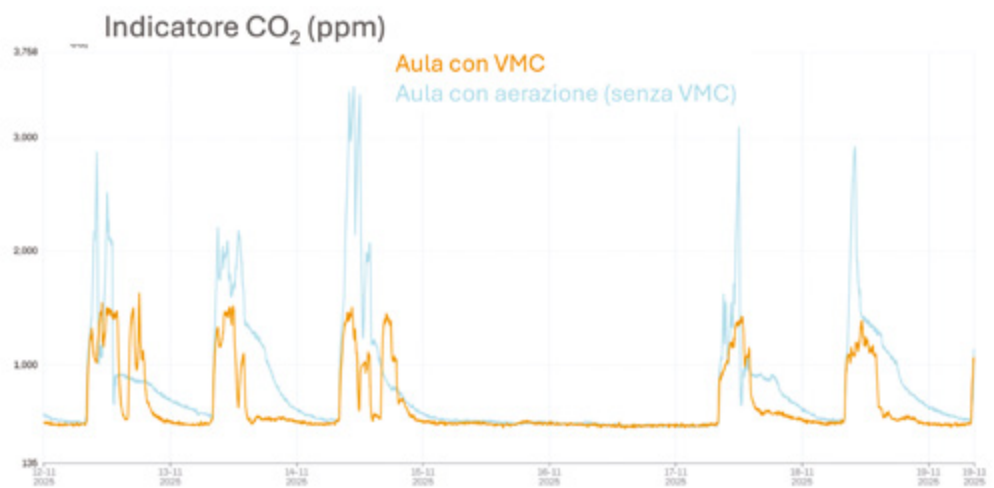


Figura 18. CO₂ in aula con e senza VMC. Scuola primaria

6.3.3 Focus monitoraggio delle scuole della Regione Abruzzo

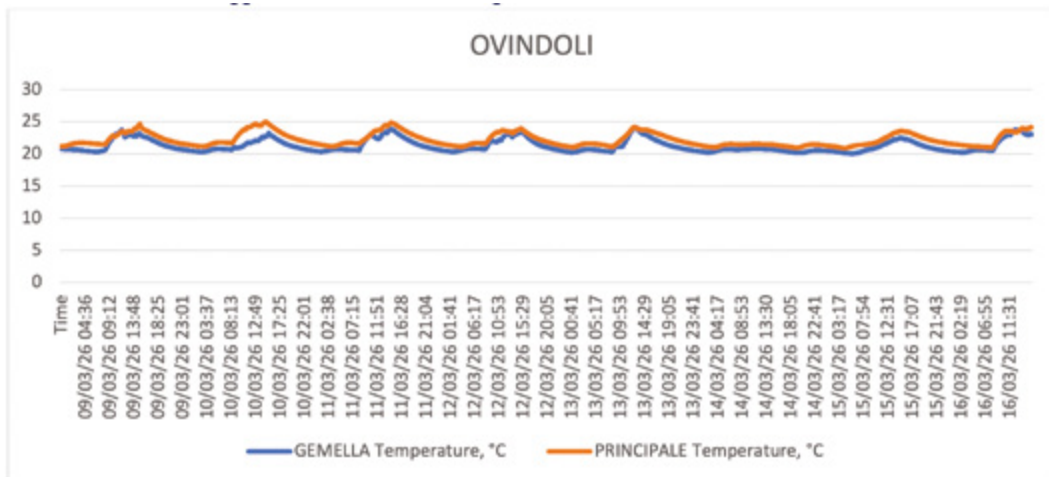


Figura 19. Temperatura dell'aria in aula con e senza VMC. Scuola primaria

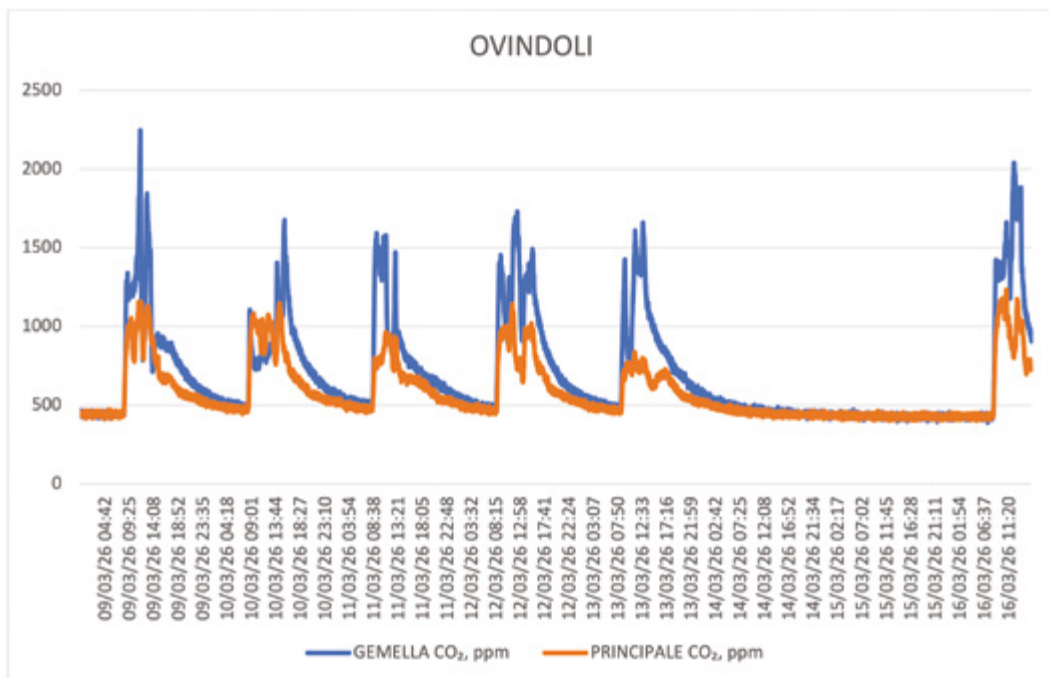


Figura 20. CO₂ in aula con e senza VMC. Scuola primaria

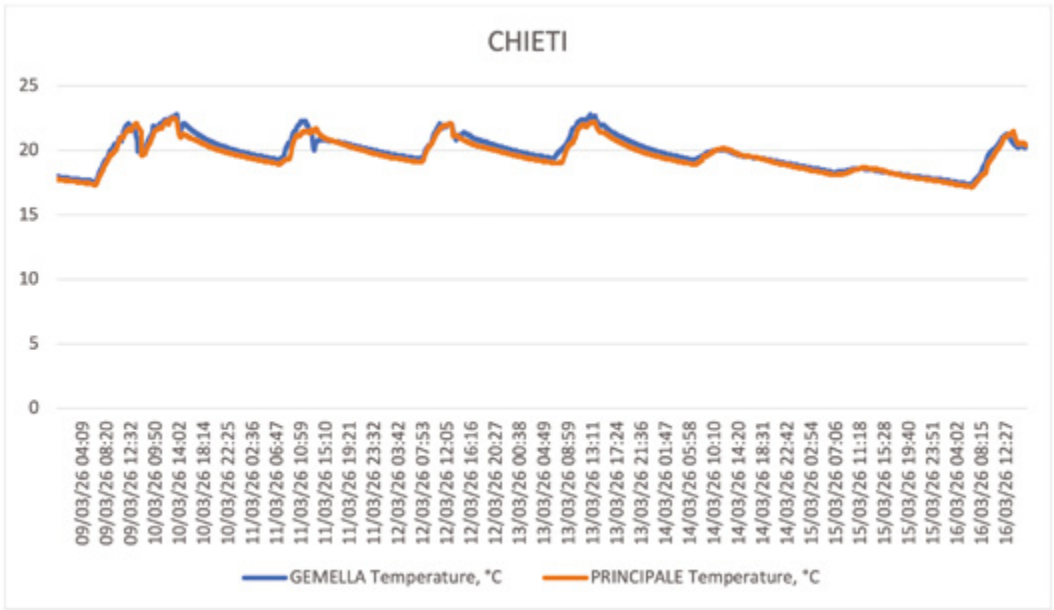


Figura 21. Temperatura dell'aria in aula con e senza VMC. Scuola primaria

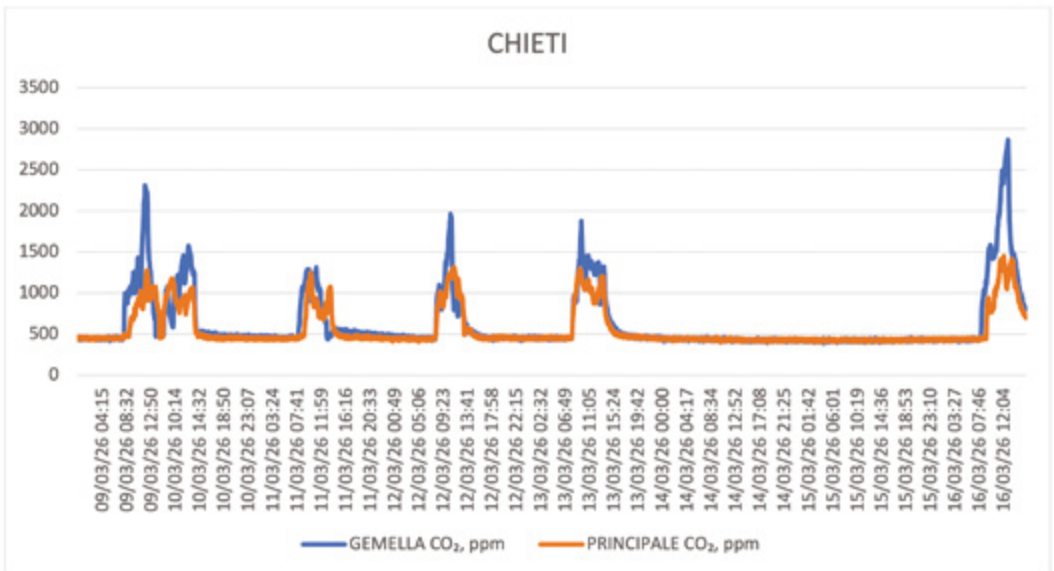


Figura 22. CO₂ in aula con e senza VMC. Scuola primaria

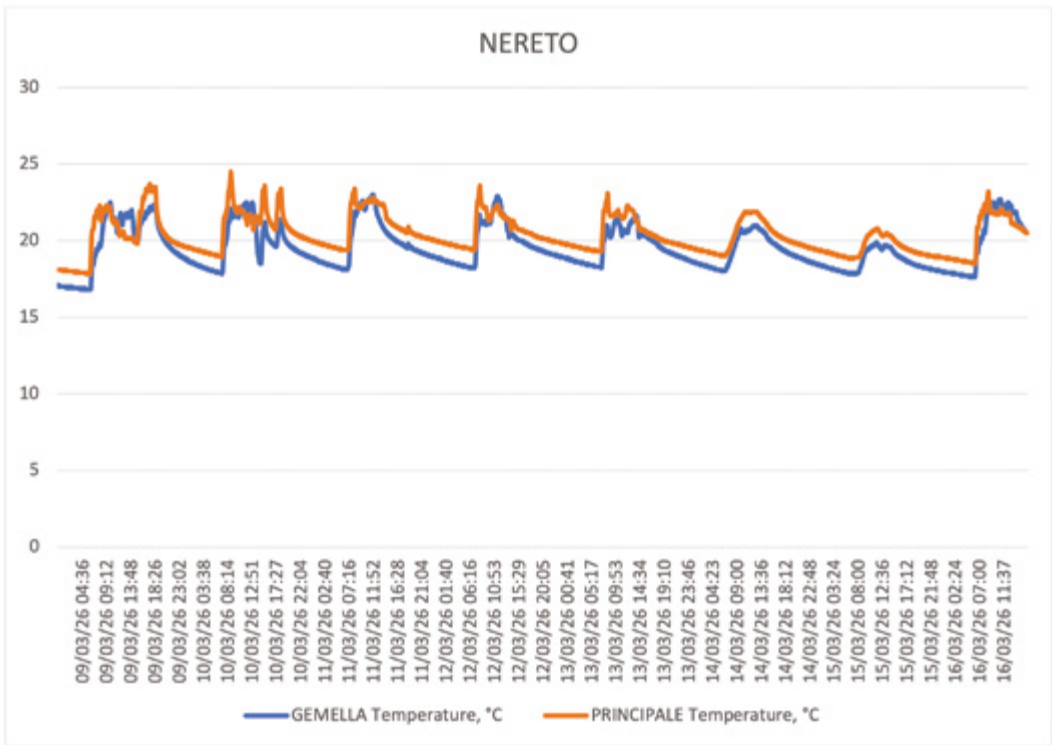


Figura 23. Temperatura dell'aria in aula con e senza VMC. Scuola primaria

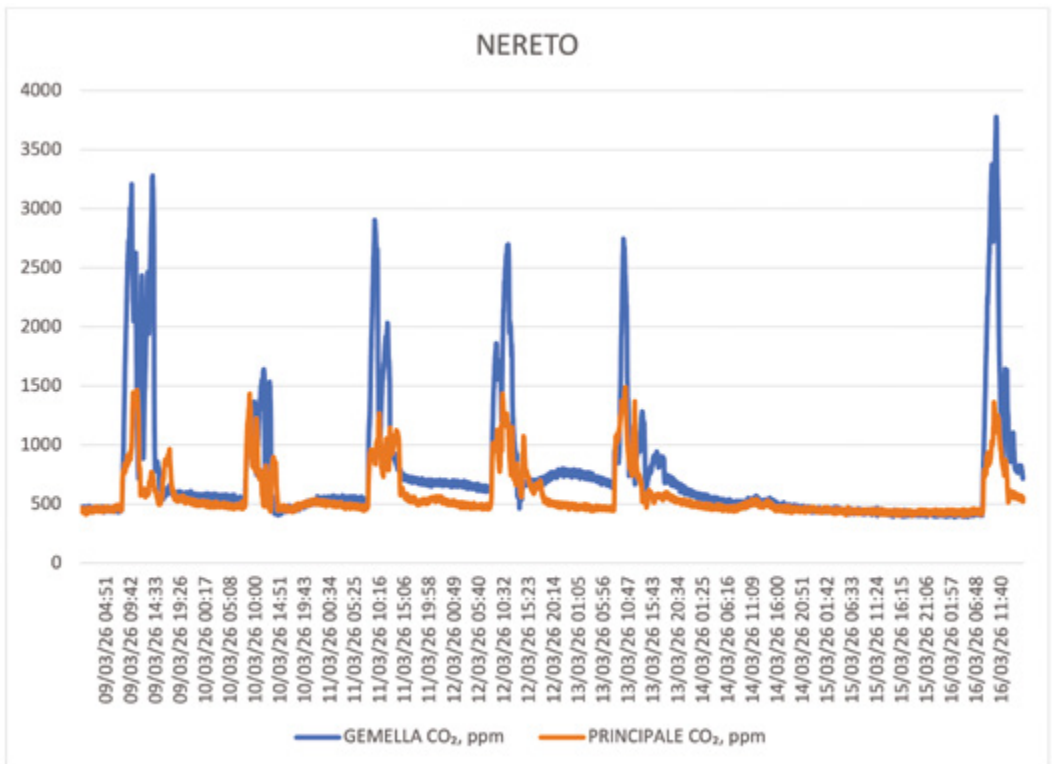


Figura 24. CO₂ in aula con e senza VMC. Scuola primaria

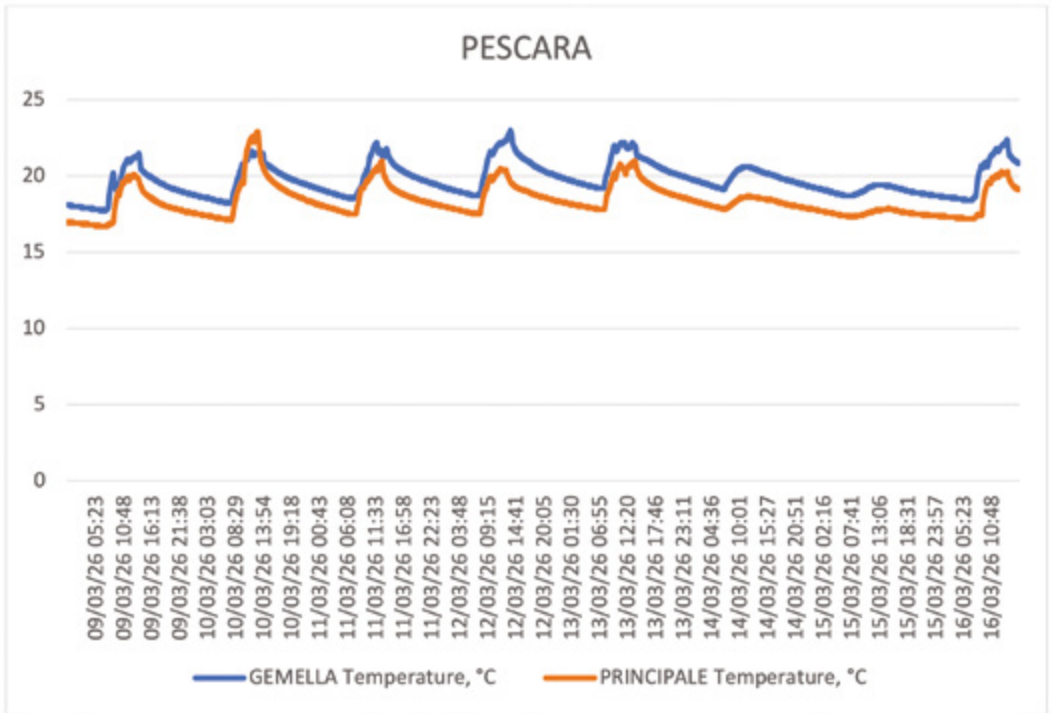


Figura 25. Temperatura dell'aria in aula con e senza VMC. Scuola primaria

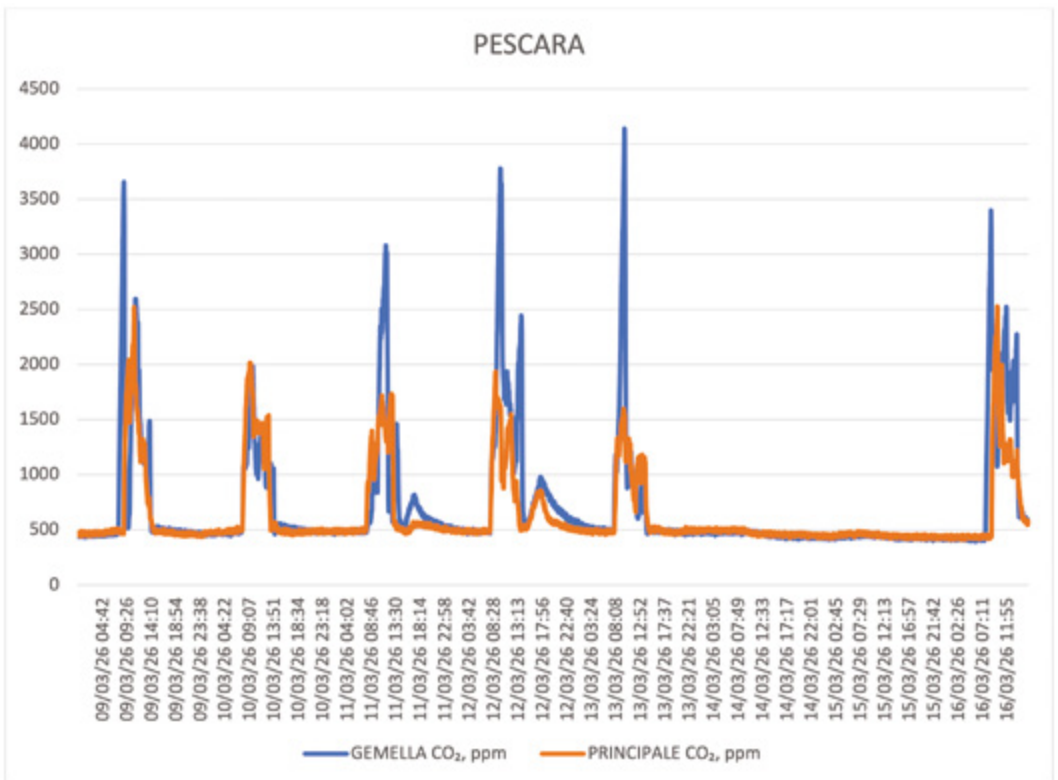


Figura 26. CO₂ in aula con e senza VMC. Scuola primaria

6.4 Il Laboratorio dell'aria

Gli inquinanti che creano il peggioramento dell'aria che respiriamo in un ambiente indoor si presentano sotto forma di particolato (polveri PM), vapori e gas.

Molta è la documentazione ad oggi disponibile sulla progettazione e gestione di sistemi di ventilazione e filtrazione dell'aria, in particolare prodotta da comitati di normazione come ISO, EN, UNI, VDI (associazione tedesca degli ingegneri). Ma quanto sistemi così realizzati sono poi effettivamente efficaci?

Questa è una delle domande che alla quale il **progetto necessARIA** ha l'ambizione di dare risposta. E ancora quanto, per il gestore di un edificio di pubblico utilizzo, come una scuola, il bilancio costi/benefici di un sistema di ventilazione/purificazione è favorevole? Inquinanti come polveri, vapori, gas hanno una vita uguale nell'aria di un ambiente indoor?

A queste domande abbiamo, in parte, provato a dare risposta realizzando, all'interno del laboratorio aria e radioprotezione della Provincia di Bolzano, un ambiente chiamato **"camera test"** dove sperimentare in condizioni reali gli effetti di diverse condizioni di ventilazione e valutarle con gli strumenti che utilizziamo nella nostra attività di sorveglianza.

6.4.1 Obiettivi specifici

Gli obiettivi specifici della ricerca sono:

1. Stabilire l'età media locale dell'aria (local mean ages of air) in diverse condizioni di ventilazione.
2. **Caratterizzare il ricambio d'aria** naturale ottenibile con diverse configurazioni di apertura delle finestre (ante, vasistas, combinazioni) e in diverse condizioni meteo esterne.
3. **Valutare le prestazioni di una VMC** reale in esercizio:
 - Confrontare le portate d'aria dichiarate dal costruttore con quelle effettive, misurate sulla macchina operativa e nel punto dove l'utente effettivamente respira.
 - Verificare la capacità della VMC di diluire la CO₂, il particolato PM (di diverse dimensioni e natura), formaldeide e VOC emessi da sorgenti realistiche (persone, materiali, incensi, candele, attività di pulizia, sigaretta elettronica, vaporizzatori).
4. **Analizzare il comportamento in ambiente dei diversi inquinanti**, distinguendo:
 - tra particolato fine (PM < 0,5 µm) e particelle più grossolane (PM > 3 µm);
 - tra gas/vapori/aerosol (es. CO₂, formaldeide, VOC), valutandone stratificazione verticale, omogeneità di distribuzione orizzontale e velocità di decadimento.
5. **Verificare, in condizioni di reale utilizzo, l'efficacia di pellicole fotocatalitiche trattate con diossido di titanio.**
6. **Fornire indicazioni operative** per la progettazione e gestione della ventilazione in ambienti scolastici (dimensionamento e posizionamento delle superfici apribili, uso e manutenzione della VMC, limiti attesi di efficacia su specifiche classi di inquinanti).

6.4.2 Metodi/Condizioni di prova

Le prove sono state condotte nella camera test del Laboratorio aria e radioprotezione, avente le seguenti caratteristiche:

- 4,4 m × 4,9 m × 3,6 m (volume ~ 78 m³),
- due finestre a doppia anta con sovrastanti vasistas.

Le prove sono state eseguite nel periodo autunno-invernale 2024/2025 e 2025/2026, con temperature esterne comprese fra 0 e 10 °C.

La VMC è stata installata su carrello, a circa 2,20 m di altezza, con possibilità di variare le portate di esercizio secondo i livelli dichiarati dal costruttore (30–120 m³/h).

Per tutte le prove sono stati applicati i seguenti metodi standardizzati e tecniche analitiche:

1. Velocità e portata	EN ISO 16911-2
2. Età media locale dell'aria	ISO 16000-8/VDI 4300 part7
3. Anidride carbonica CO ₂	EN ISO 16000-26
4. Formaldeide HCHO	VDI 3862 part 6
5. Polveri PM	VDI 3867 part 1
6. Composti organici volatili totali COVT	Photo ionizator detector (PID)
7. Composti organici volatili COV	Canister

Le prove sono state ripetute più volte per dare maggiore robustezza ai risultati.

Traccianti e scenari di prova

Come traccianti abbiamo utilizzato polveri, gas e vapori che si sviluppano in condizioni reali di utilizzo, senza aggiunte "artificiali" (ad es. SF₆):

- Il PM < 0,5µm generato dalla combustione di bastoncini di incenso, questo particolato è molto sottile, ha una vita in sospensione nell'aria più lunga. La combustione dei bastoncini produce inoltre concentrazioni significative di composti organici volatili (cov), in particolare formaldeide, benzene e toluene
- Il PM >3µm (particolato) sollevato dal movimento delle persone, dal distacco di particelle di cute, dalla pulizia delle superficie dai vaporizzatori, questo particolato è di dimensioni più grandi
- La CO₂ (gas) prodotta dalle persone presenti nella camera. Una persona produce molta CO₂ in poco tempo. Per la valutazione del decadimento alla concentrazione di CO₂ prodotta dalle persone va sottratta la concentrazione di CO₂ immessa nel medesimo ambiente, allo stesso tempo
- I vapori prodotti da vaporizzatori, spray e sigarette elettroniche.

Sono stati condotti:

1. Prove di aerazione naturale in quattro condizioni:

- Test 0: porte e finestre chiuse (assenza di ricambio intenzionale)
- Test 1: apertura di una sola anta di finestra
- Test 2: apertura di anta finestra + vasistas superiore
- Test 3: solo vasistas superiore aperti.

2. Prove con ventilazione meccanica (VMC):

- Simulazione di attività tipiche indoor (persone che parlano e mangiano, incensi e candele, pulizie, sigaretta elettronica, vaporizzatori)
- Confronto tra condizioni con VMC spenta e VMC attiva (in particolare a v4 ≈ 80 /h, circa 1 ricambio/ora, e a v5 = 120 m³/h, le portate più basse non sono state considerate)
- Analisi dei decadimenti di particelle solide vs particelle di vapore (es. da sigaretta elettronica), per distinguere tra fenomeni di sedimentazione e condensazione
- Valutazione del ruolo della VMC nel contenere picchi impulsivi di particelle grossolane (> 3 µm) rispetto al particolato fine.

3. Prove con pellicole fotocatalitiche al diossido di titanio:

All'interno della camera test sono state disposte delle pellicole, in quantità, così come indicato dal produttore. Sono stati generati inquinanti (VOC's, formaldeide, polveri PM) che, a detta del produttore, le pellicole sono in grado di abbattere e ne è stata valutata l'efficacia effettiva.

6.4.3 Caratteristiche camera test (laboratorio dell'aria)

Nelle immagini di seguito rappresentate vengono rappresentate schematicamente forme e dimensioni della “camera test”. I serramenti di vecchia concezione, realizzazione e privi di isolamento termico, hanno comunque il vantaggio di consentire diverse modalità di apertura. Le prove sono state fatte durante il periodo autunno-invernale 2024/2025 e 2025/26, con temperature esterne varianti fra 0°-10°C.

La macchina di ventilazione è stata montata su un carrello, sospesa a circa 2,20 m di altezza, in questo modo si è evitato di praticare fori sulle pareti e sulle finestre, può essere velocemente rimossa ed utilizzare normalmente la finestra.

Forma, dimensioni e posizionamento delle finestre apribili incidono in modo significativo sull'efficacia della ventilazione e sui costi energetici, posizionamento di immissione ed espulsione dell'aria di una VMC incidono in modo altrettanto significativo sulle performance e i costi di esercizio della macchina.

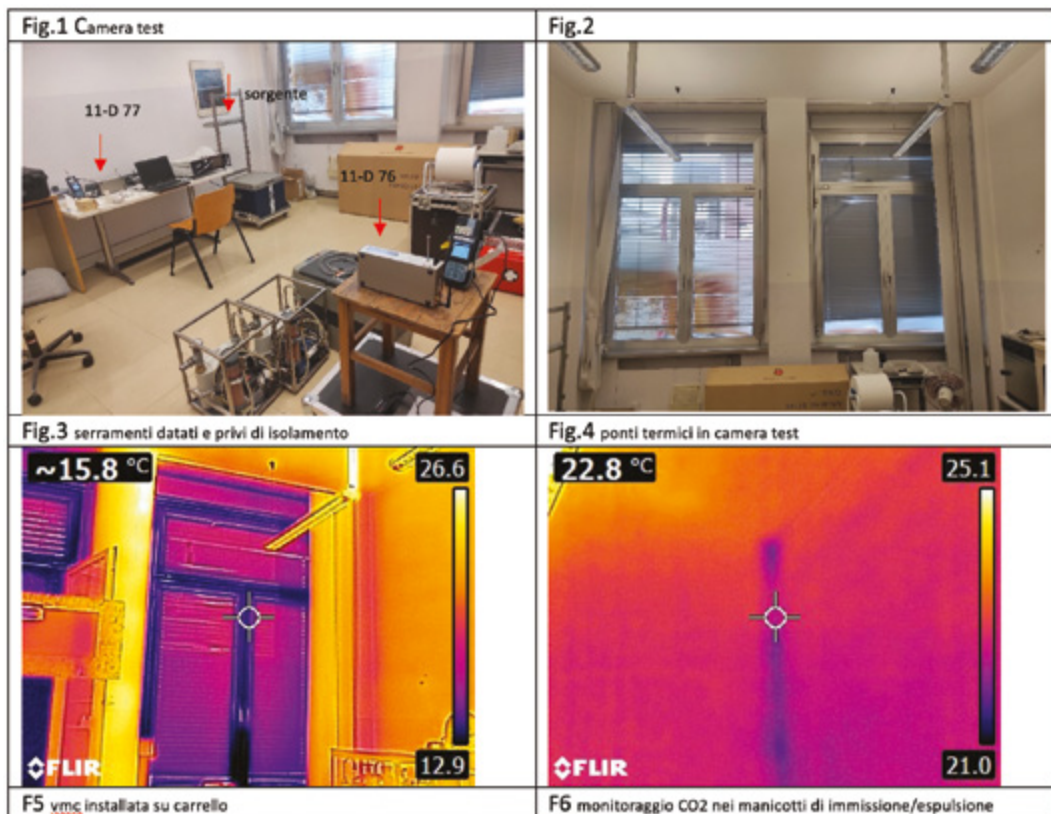




Fig.7 schema camera test con disposizione strumenti e persone

Tab.1



Dimensioni stanza:

L 4,40m

P 4,90m

H 3,60m

2 finestre doppia anta con 2 finestre vasistas sovrastanti

finestre

L 1,60m

H 1,70m

vasistas

L 1,60m

H 0,60m

T esterna durante Test 1 ; 4,1°C

T esterna durante Test 2 ; 6,2°C

T esterna durante Test 3 ; 3,5°C

Pressione atmosferica durante i test 1000 hPa

METODI DI MISURA

Per tutte le prove sono stati impiegati metodi standardizzati e tecniche analitiche, in particolare:

- | | |
|---|--------------------------------|
| 1. Velocità e portata | EN ISO 16911-2 |
| 2. Età media locale dell'aria | ISO 16000-8/VDI 4300 part7 |
| 3. Anidride carbonica CO ₂ | EN ISO 16000-26 |
| 4. Formaldeide HCHO | VDI 3862 part 6 |
| 5. Polveri PM | VDI 3867 part 1 |
| 6. Composti organici volatili totali COVT | Photo ionizator detector (PID) |
| 7. Composti organici volatili COV | Canister |

Tutte le prove sono state ripetute più volte per dare robustezza ai risultati.

In particolare, la norma ISO 16000-8 determina le portate locali dell'aria all'interno di un ambiente di vita espresse in:

- ricambi/ora n/h
- portata m³/h
- età media locale dell'aria hh,min

La determinazione dell'**età media locale dell'aria** (local mean ages of air) fornisce, a nostro parere, un valore più "palpabile" dello stato di ventilazione, sia naturale che meccanica, all'interno di un ambiente. L'età media locale dell'aria ci dice il tempo medio che un volume di inquinante ha trascorso in un punto particolare della stanza prima di essere completamente diluito. La misura dell'età locale media dell'aria ci fornisce inoltre il numero di ricambi per ora e la portata nel punto esatto dove la persona sta respirando, relativamente a diversi inquinanti. Per un medico, un igienista l'età media dell'aria è un dato che dà più il "polso" della situazione.

I risultati di tutte le prove che abbiamo fatto sono esclusivamente relativi alla camera test esaminata e al periodo durante il quale si sono svolte, ma le modalità utilizzate sono a nostro parere applicabili ad ambienti di forma e dimensioni diverse e con tipologie di ventilazione diverse.

6.4.4 Test con i traccianti

La norma ISO 16000-8, descrive il metodo per la determinazione delle portate locali dell'aria utilizzando traccianti, come l'esafluoruro di zolfo (SF₆), da immettere per determinarne il decadimento nell'ambiente in esame (valutare la rapidità della loro diluizione e, attraverso calcoli, risalire poi alle portate).

Come traccianti abbiamo utilizzato polveri, gas e vapori che vengono prodotti in condizioni reali di utilizzo:

- Il PM < 0,5µm generato dalla combustione di bastoncini di incenso, questo particolato è molto sottile, ha una vita in sospensione nell'aria più lunga, la combustione produce inoltre concentrazioni significative di composti organici volatili (cov), in particolare formaldeide, benzene e toluene
- Il PM >3µm (particolato) sollevato dal movimento delle persone, dal distacco di particelle di cute, dalla pulizia delle superficie dai vaporizzatori, questo particolato è di dimensioni più grandi e ha una vita in sospensione più breve
- La CO₂ (gas) prodotta dalle persone presenti nella camera. Una persona produce molta CO₂ in poco tempo (da 20 a 180 L/h a seconda dell'attività svolta). Per la determinazione del decadimento alla concentrazione di CO₂ prodotta dalle persone va sottratta la concentrazione di CO₂ immessa nel medesimo ambiente e nel medesimo tempo dall'esterno
- I vapori prodotti da vaporizzatori, spray e sigarette elettroniche
- La formaldeide rilasciata da pannelli e prodotta dalla combustione di bastoncini di incenso.

6.4.5 Verifica delle prestazioni della VMC

Vengono messe a confronto le portate dichiarate dal costruttore con quelle misurate sulle griglie di immissione/espulsione della macchina senza cover e sui manicotti di immissione/espulsione con cover montata.

Tab. 2

modo	Dichiarato dal costruttore m ³ /h	Espulsione senza cover m ³ /h	Con cover, misurato sul manicotto di espulsione 100 mm m ³ /h
v1	30	30	nm
v2	45	45	nm
3v	60	58	nm
v4	80	78	70
v5 turbo	120	110	100

Osservazioni

In Tab. 2 si osserva che, senza cover, sulle griglie di aspirazione e di immissione, la portata misurata è vicina/uguale a quella dichiarata, ma con cover montata e misurando sul manicotto di espulsione la portata è sensibilmente più bassa di quella dichiarata (-12%).

- L'efficienza della VMC dipende da come questa viene installata
- Come e dove viene misurata la portata della macchina è inoltre fondamentale per la correttezza delle valutazioni successive.

6.4.6 Prove di aerazione

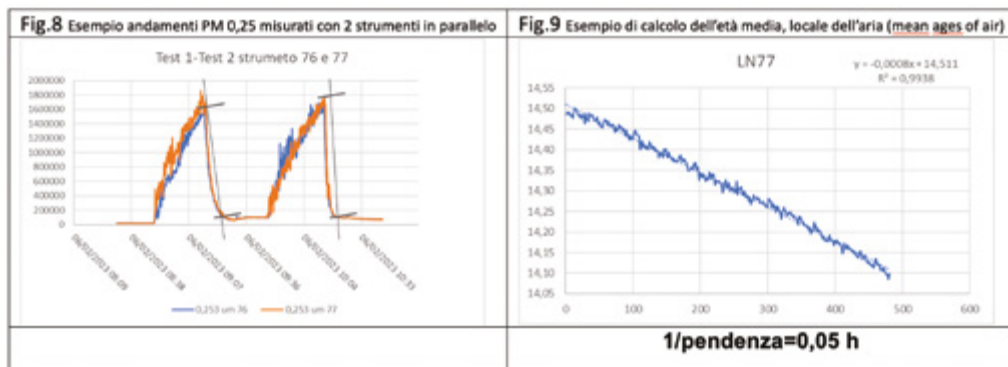
La prova viene effettuata in 4 condizioni di apertura delle finestre (Test 0,1,2,3). L'età media dell'aria viene determinata col metodo del decadimento descritto al 7.1 della norma ISO 16000-8 (Viene valutata la regressione lineare della concentrazione dell'inquinante, espressa come logaritmo naturale) come tracciante abbiamo usato la polvere generata dalla combustione di uno o più bastoncini di incenso. Questa polvere è molto sottile $< 0,5\mu\text{m}$ e, se non diluita, rimane in sospensione nell'aria per lunghi periodi.

La misura è stata effettuata utilizzando due spettrometri GRIMM-OPC-11D, lo strumento integra la lettura della concentrazione e distribuzione granulometrica in 31 classi dimensionali (0.25-35 μm , equidistanti):

1. Test 0: porte e finestre chiuse, senza movimento d'aria, durante e dopo la combustione degli incensi, fino a diluizione completa dell'aria
2. Test 1: porte e finestre chiuse durante la combustione senza movimento d'aria, poi un'anta della finestra sx aperta e attesa fino a diluizione completa dell'aria
3. Test 2: porte e finestre chiuse durante la combustione senza movimento d'aria. Apertura di ante finestra e vasistas fino a diluizione completa dell'aria
4. Test 3: porte e finestre chiuse durante la combustione senza movimento d'aria.

Apertura delle 2 finestre a vasistas e attesa la diluizione completa dell'aria.

RISULTATI

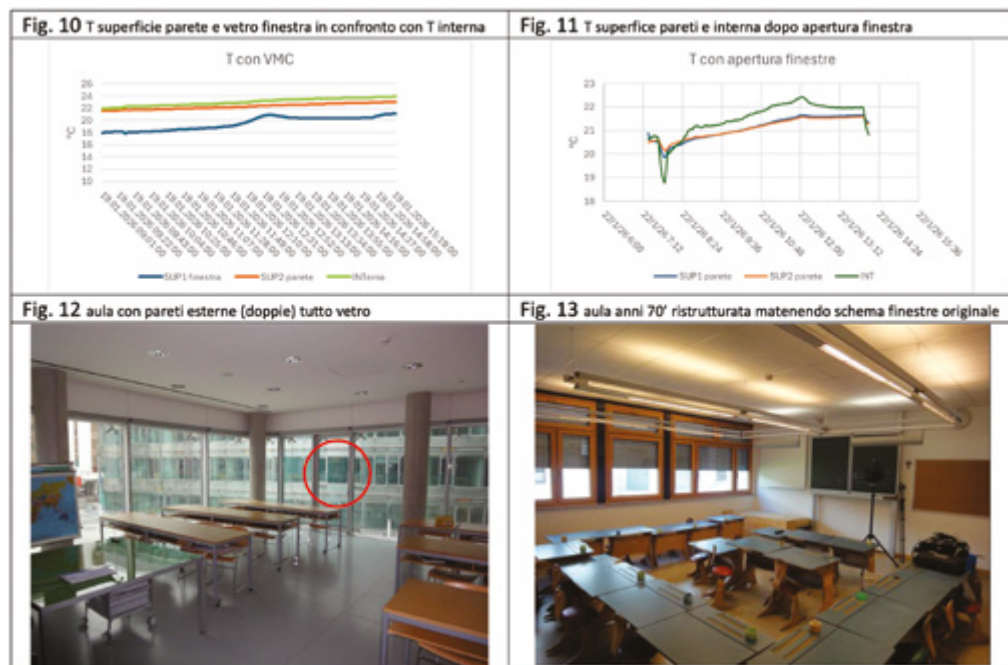


Tab. 2 – risultato

Test nr	Mean ages of air - GRIMM 77 h,min	Mean ages of air - GRIMM 76 h,min
0 - tutto chiuso	20	20
1 – 1 finestra	0,12	0,12
2 – 1 finestra + vasistadas superiore	0,05	0,05
3 – solo vasistadas superiore	0,73	0,73

Osservazioni

1. Il criterio, 1 finestra aperta, rispetta il requisito della superficie finestrata apribile che non deve essere inferiore ad 1/10 della superficie del pavimento (direttiva edilizia scolastica provincia di Bolzano 23/02/2009 nr. 10).
2. Aprendo le finestre l'aria esterna, più fredda e quindi più pesante dell'aria interna, si distribuisce inizialmente verso il basso e spinge l'aria viziata interna, più calda, verso l'alto.
3. Con anta finestra e vasistas aperte, l'espulsione dell'aria viziata è molto più rapida che con solo anta aperta.
4. La sola apertura del vasistas allunga l'età media dell'aria e raffredda di più le pareti (Fig. 11), più veloce è il ricambio, meno si raffreddano le pareti, minori saranno i costi energetici.
5. L'età media dell'aria misurata in tutte condizioni di apertura dipende in modo significativo dalla temperatura esterna dell'aria.



- La progettazione delle finestre apribili deve consentire il ricambio dell'aria il più rapido possibile per incidere meno sui costi ed essere allo stesso tempo efficace.
- In Fig. 12 un'aula di recente realizzazione, pareti tutto vetro, doppia parete di 40 cm isolata fra piano e piano, una sola finestra apribile, posta in posizione centrale. Il ricambio d'aria in questa condizione è molto difficoltoso e nei periodi caldi è praticamente nullo, pur lasciando l'unica finestra disponibile aperta h24. La doppia parete in vetro, isolata piano per piano, provoca temperature interne molto elevate (34° a settembre, aula occupata).
- In Fig. 13 un'aula realizzata negli anni 70', nella ristrutturazione è stato mantenuto lo schema di finestratura originale, qui l'efficacia del ricambio dell'aria aprendo le finestre è massimizzato.

6.4.7 Prove con ventilazione meccanica controllata (VMC)

Le prove si sono svolte secondo le indicazioni contenute della norma ISO 16000-8.

Sono state simulate alcune attività reali in ambiente INDOOR come:

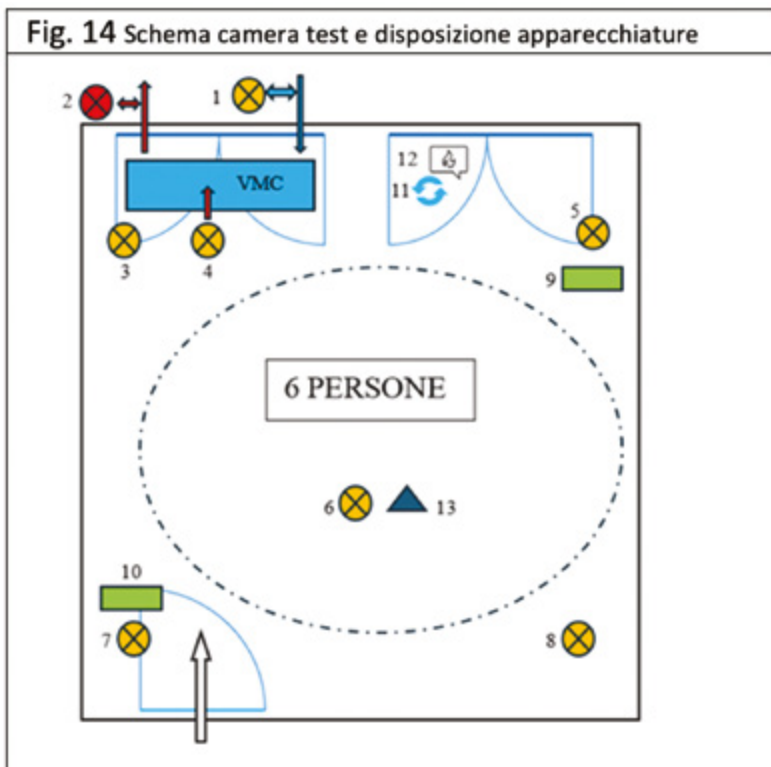
1. Persone che discutono, consumano alimenti
2. Accensione di incensi e candele
3. Vaporizzatori
4. Sigarette elettroniche
5. Attività di pulizie con scopa, canovacci umidi e spray

- La strumentazione è stata posizionata nella camera così come schematicamente rappresentato in Fig. 14

- Le prove sono effettuate a V4 (80m³/h) e turbo (120 m³/h), V1,V2 e V3 non sono state considerate perché troppo basse per lo scopo.

- Le attività sopra descritte si sono svolte prima con VMC spenta e quindi avviata a v4, 80 m³/h (circa 1 ricambio/h) per tutto il tempo rimanente della prova. Nel periodo di camera non occupata, per mantenere un minimo di movimento dell'aria, era in funzione un ventilatore a bassissima velocità.

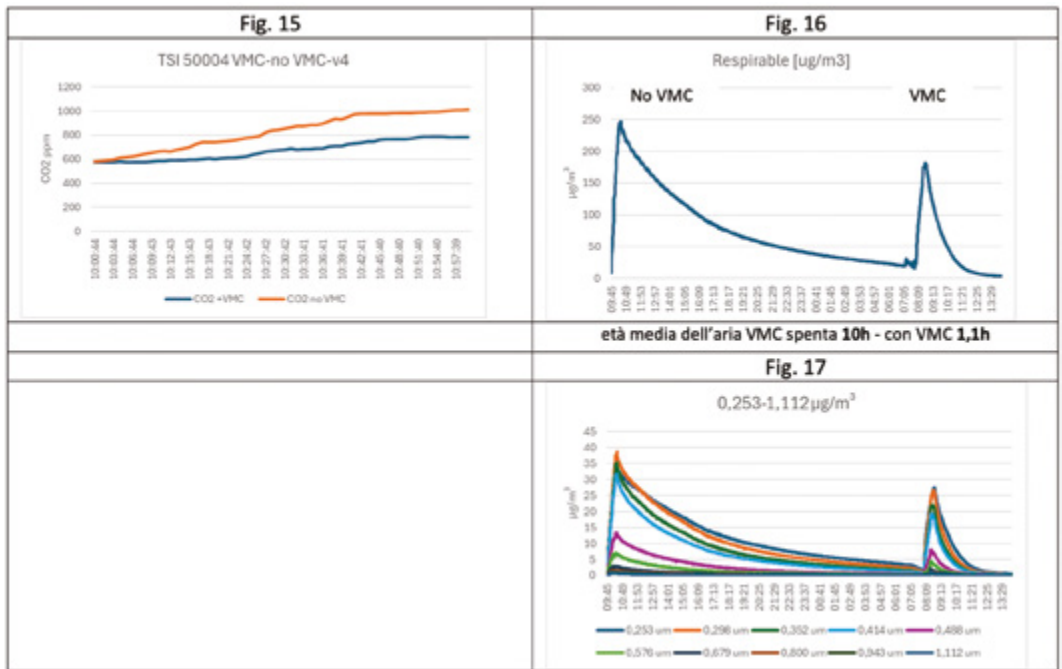
- Altre prove sono state effettuate con VMC messa in funzione prima dell'inizio delle attività.



Tab.3 *Legenda*

Posizione	Tipo
1-8	CO ₂ -IR
9-10	PM-spettrometro
13	VOC-PID
11	Ventilatore a bassa velocità
12	Sorgente incensi candele

Confronti VMC – no VMC



Portate misurate con decadimento secondo ISO 16000-8

Tab 4

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
nr	tipo	SN	posizione	volume stanza m ³	Portata misurata m ³ /h	manicotto espulsione m ³ /h	manicotto immissione m ³ /h	dichiarata	F-H%	F-I %	n/h	età media h,mm	età media min	CO ₂ ambiente
1	CO ₂	250004	immissione			70	70	80						
2	CO ₂	220003	espulsione	78	67	70	70	80	96	84	0,85	1,2	80	1078
3	CO ₂	47001	NE	78	63	70	70	80	90	79	0,81	1,2	80	1125
5	CO ₂	622001	SE	78	62	70	70	80	89	78	0,79	1,3	90	1136
6	CO ₂	DOH795	centro	78	62	70	70	80	89	78	0,79	1,3	100	1129
7	CO ₂	31001	NO	78	63	70	70	80	90	79	0,80	1,2	80	1152
8	CO ₂	DOH794	SO	78	62	70	70	80	89	78	0,79	1,3	90	1115
9	PM	77	NO	78	69	70	70	80	99	86	0,89	1,1	70	
10	PM	76	SE	78	71	70	70	80	101	89	0,91	1,1	70	
11	HCHO	AL-4021	NO	78	63	70	70	80	90	79	0,80	1,2	83	

Legenda

F portata misurata con metodo del decadimento al manicotto di espulsione
 G-H portate misurate con l’anemometro ai manicotti di immissione e di espulsione
 I portata dichiarata dal costruttore

Tab 5: confronti delle portate determinate col decadimento e utilizzando traccianti diversi

A	B	C	D	E	F	G
Tracciante tipo	Portata dichiarata dal costruttore	Portata misurata al manicotto espulsione con anemometro	Portata decadimento al manicotto di espulsione	Portata decadimento media punti di misura	Differenza B-E	Età media dell'aria
	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	%	minuti
CO ₂ ppm	80	70	67	62	78	88
PM 0,2µm	80	70	nm	70	88	70
HCHO ppb	80	70	nm	63	79	83

Osservazioni

1. La determinazione delle portate locali dell'aria è stata ripetuta più volte a v4 (80 m³/h) e una volta a v5 (120 m³/h), i risultati ottenuti sono confrontabili e ripetibili (per la CO₂) secondo le seguenti funzioni:

$$r = 0,007C + 53,4$$

$$\bar{u} = 0,019C + 26,8$$

2. Nelle condizioni esaminate la distribuzione orizzontale della CO₂ e dei PM all'interno della stanza è omogenea (le differenze fra le 5 concentrazioni misurate rientrano nei limiti di ripetibilità stabiliti per il metodo). Verticalmente la CO₂ (più pesante dell'aria) tende invece a stratificare verso il basso mentre il PM 0,2 µm tende a distribuirsi in modo più omogeneo in tutto il volume della stanza.

3. Anche la formaldeide tende a stratificare verso il basso.

4. Nelle condizioni esaminate la portata effettiva ai 5 punti di misura nella stanza, ottenuta col decadimento della CO₂ e pari al 78% rispetto alla portata nominale della VMC e del 90% rispetto alla portata effettiva misurata al manicotto di espulsione.

5. Nelle condizioni esaminate la portata effettiva ai 2 punti di misura dei PM, ottenuta considerando il decadimento del PM 0,2 µm e pari all'88% rispetto alla portata nominale della VMC e del 100% rispetto alla portata effettiva misurata al manicotto di espulsione.

6. La differenza fra la portata misurata col decadimento della CO₂ e la portata misurata con il PM 0,2 µm è dovuta "verosimilmente" alla massa volumica maggiore della CO₂ (1,294 kg/m³ aria - 1,965 kg/m³ CO₂)

7. In Fig.15 è rappresentato l'andamento della CO₂ (3 persone che discutono) con VMC spenta e con VMC in funzione, la differenza fra le due condizioni è evidente, con VMC spenta le condizioni di equilibrio sono raggiunte sopra i 1000 ppm, con VMC in funzione le stesse condizioni sono raggiunte sotto gli 800 ppm.

8. In Fig.16 il confronto VMC-noVMC è rappresentato dagli andamenti della frazione respirabile generata dalla combustione di un incenso. Il contributo della VMC anche in questo caso è evidente, in particolare la velocità di diluizione dell'aria misurata all'esaurimento dell'incenso è sensibilmente più veloce.

9. In Fig.17 è rappresentata la distribuzione granulometrica del particolato generato dalla combustione di un bastoncino di incenso, questa analisi dimostra che le dimensioni dei PM generati dalla combustione degli incensi sono prevalentemente <0,5 µm.

Commenti

- La misura della portata della VMC va effettuata nelle condizioni d'uso della macchina, in questo modo vengono valutate anche le eventuali perdite di carico. Dalle prove effettuate in "camera test" abbiamo osservato che impostando la macchina per una portata di 80 m³/h (V4), la portata effettiva all'utente era circa il 22% in meno, se ad essere diluiti sono composti come CO₂ e formaldeide che tendono a stratificare verso il basso, mentre la portata effettiva all'utente, determinata col decadimento del PM 0.2 µm che tende a stratificare verso l'alto, era circa il 12% in meno rispetto agli 80 m³/h nominali della macchina. Nelle condizioni di prova in esame la VMC si è dimostrata quindi più efficiente con inquinanti più leggeri dell'aria piuttosto che con inquinanti più pesanti.

- Scarsa manutenzione della VMC aumenta le perdite di carico oltre che a peggiorare la qualità dell'aria immessa nell'ambiente. Cito un esempio reale: durante la mia attività di sorveglianza ho accertato che in un edificio di 4 piani, adibito ad uffici, con finestre non apribili, o parzialmente apribili, da 18 anni non veniva effettuata la manutenzione dell'impianto VMC centralizzato. A ragione gli occupanti lamentavano una cattiva qualità dell'aria.

- È altrettanto importante conoscere il funzionamento dell'impianto VMC di un edificio, questo non è sempre scontato, in un grande edificio scolastico, nuovo, ho accertato che l'impianto VMC reimmetteva negli ambienti il 100% dell'aria viziata prelevata dagli stessi ambienti, nessuno del personale della scuola se ne era accorto e nessuno era a conoscenza delle procedure per modificare le impostazioni dell'impianto.

6.4.8 Comportamento inquinanti in camera test

Dalle prove precedenti abbiamo osservato che composti, in sospensione nell'aria, rendono più o meno efficace l'azione della VMC a seconda se tendono a distribuirsi uniformemente su tutto il volume, come PM sottili <0,5µm, oppure a stratificare verso il basso come CO₂ e Formaldeide.

Abbiamo integrato queste prove osservando nella camera test il comportamento di particelle più grandi, generate dalla presenza e dal movimento delle persone, dalle pulizie effettuate con scopa e stracci, il vapore generato da vaporizzatori e sigarette elettroniche e osservato il loro comportamento.

Bisogna tenere presente che gli spettrometri utilizzati per la misura dei PM non distinguono fra una particella solida e una di vapore della stessa dimensione, osservando però la rapidità del loro decadimento si comprende cosa è l'una e cosa è l'altra, le particelle di vapore, condensano e decadono molto più in fretta rispetto alle particelle solide della stessa dimensione.

Abbiamo caratterizzato i composti generati nella camera test dalla combustione di un bastoncino di incenso e da 5 minuti di sigaretta elettronica, i risultati sono riportati in Tab.6:

Tab.6:

1 bastoncino di incenso

		misurato	limite
Polveri respirabili	µg/m ³	140	15
Formaldeide	µg/m ³	62	123
Benzene	µg/m ³	10	100
Toluene	µg/m ³	18	-

Sigaretta elettronica

Glicole propilenico	µg/m ³	18
Etanolo	µg/m ³	5

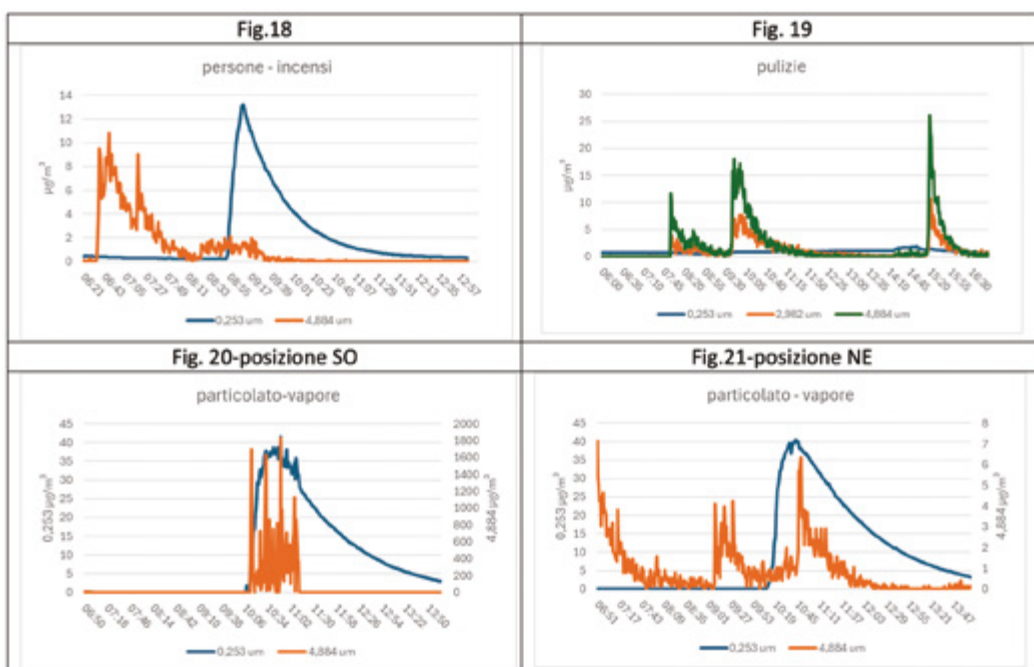
Limiti

Formaldeide	circolare del Ministero della Sanità, n. 57 del 1993
Benzene	OMS (valore limite di soglia)
Polveri respirabili	OMS (media 24h)

Osservazioni

1. Le concentrazioni generate dalla combustione dell'incenso non sono trascurabili, in particolare PM, formaldeide e benzene.
2. La formaldeide misurata è generata per combustione e non per idrolisi, nel primo caso l'emissione è limitata alla durata della combustione, nel secondo caso l'emissione nell'ambiente è costante e prolungata nel tempo (anni).
3. Glicole propilenico ed etanolo sono tipici componenti delle sigarette elettroniche, le concentrazioni misurate sono basse.

Prove comportamento in aria di inquinanti diversi:



Osservazioni

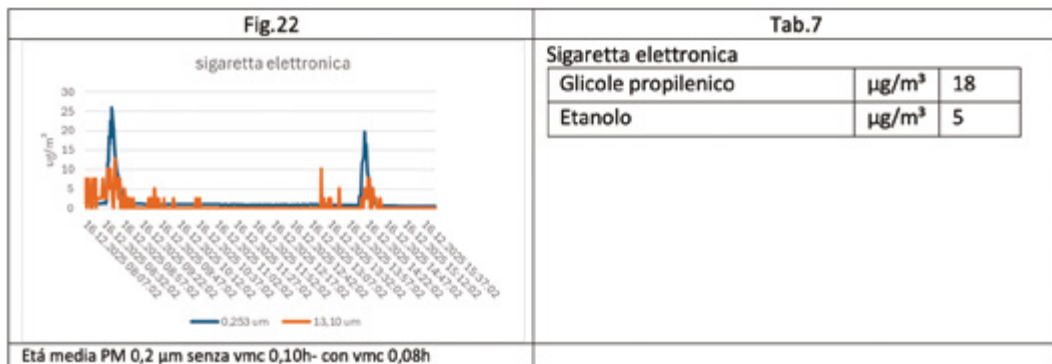
1. In Fig. 18 sono riportati gli andamenti dei PM, all'interno della camera test, sollevati dal movimento delle persone e dalla combustione di un incenso, il picco più alto del PM 0,2µm corrisponde all'avvio della VMC.
2. In Fig. 18-19-20-21 si osserva che il movimento delle persone solleva polveri di dimensione >5 µm, queste vengono sollevate in modo impulsivo e decadono molto in fretta, con o senza VMC.
3. In Fig. 18-19-20-21 Il decadimento del PM 0,2µm si distingue nettamente dal PM 5 µm in aria hanno comportamenti diversi.
4. In Fig. 20 e 21 sono riportati gli andamenti generati da movimento persone, vaporizzatori e incenso.

5. In Fig. 20 e 21 si osserva che la concentrazione di PM misurata vicino alla sorgente di vapore (Fig.20) raggiunge valori $>1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Questi picchi sono impulsivi e molto brevi e non sono influenzati dalla VMC. Osservando l'andamento del PM $0,2 \mu\text{m}$ in Fig.20 di nota un andamento irregolare per tutta la durata dell'immissione dei vapori.

6. In Fig. 21 mostra gli andamenti dei PM durante la stessa prova di Fig. 21 ma misurata vicino alla parete opposta alla sorgente. I picchi elevati di vapore non ci sono, si nota solo un leggero movimento di polveri più grandi sollevato dalle persone. Il PM $0,2 \mu\text{m}$ invece raggiunge gli stessi livelli di concentrazione di quelli misurati vicino alla sorgente.

7. In Fig.19 è rappresentato l'andamento dei PM durante le attività di pulizia, con e senza VMC. Si conferma quanto già osservato nelle prove precedenti: i PM $< 0,2 \mu\text{m}$ sono trascurabili, i PM $>3 \mu\text{m}$ non sono influenzati dalla VMC

Sigaretta elettronica



Osservazioni

1. Si conferma quanto già osservato nelle prove precedenti, emissioni impulsive di particelle più grandi, qui però è presente una componente di PM $0,2 \mu\text{m}$ che ha permesso di determinare l'età media dell'aria, 10' senza VMC, 8' con VMC, l'influenza della VMC è praticamente nulla, il decadimento in ambedue le situazioni è molto rapido, a mio parere, perché le particelle di vapore condensano in particelle più grandi.

Commenti

Dalle prove con emissioni di vapori, polveri e gas emerge che la VMC installata in camera test è stata efficace nel contenere il livello massimo di emissioni continue di gas e PM $< 0,5 \mu\text{m}$. Meno efficace (quasi nulla) nel contenere emissioni impulsive particelle più grandi $>3 \mu\text{m}$. queste particelle hanno una durata limitata in aria nel tempo, decadono molto rapidamente e non si distribuiscono in modo omogeneo all'interno della stanza, la persona le subisce solo se si trova nella loro traiettoria oppure appoggiandosi sulle superfici dove si sono depositate. I PM sottili $< 0,5 \mu\text{m}$ e la CO_2 rimangono più tempo in aria, si distribuiscono in modo più omogeneo all'interno della stanza e la VMC è più efficace nel diluirli.

6.4.9 Prove con pellicole trattate all'ossido di titanio

PREMESSA

Di seguito si riportano prove effettuate dal Laboratorio analisi aria e radioprotezione, nel mese di agosto 2023, con pellicole fotocatalitiche, trattate con diossido di titanio. Le pellicole sono state consegnate al laboratorio con la libertà di effettuare tutte le prove ritenute necessarie.

Il produttore documenta, che le pellicole sono efficaci in ambienti indoor nel ridurre la concentrazione di batteri, virus, VOC's, formaldeide, polveri PM. Il produttore delle pellicole descrive inoltre, in modo esauriente, i meccanismi di funzionamento della fotocatalisi e del diossido di titanio, rimandiamo quindi a queste per ulteriori approfondimenti.

In sintesi, le pellicole trattate con diossido di titanio, in presenza di luce e umidità si attivano e riducono la presenza degli inquinanti sopra elencati, non solo depositati sulle superfici, ma anche quelli sospesi in aria.

Si riportano alcuni estratti di queste pubblicazioni che sono stati utili a guidare le prove effettuate:

1. 25 m² di pellicola sono in grado di trattare 2000 m³ d'aria in un'ora (1m² di pellicola per 80m³).
2. Il sistema della fotocatalisi con nanoparticelle trattate all'ossido di titanio abbatte nanoparticolato, polveri sottili, composti organici volatili (VOC) e odori fino ad oltre l'80%.
3. Il sistema riduce la carica batterica del 95% già entro la prima ora.
4. I moti convettivi dell'aria e i movimenti del personale all'interno dello spazio indoor, rimettono in moto dinamico il materiale particolato che viene ricatturato dalle superfici, comprese le pellicole fotocatalitiche. C'è dunque un ciclo continuo di materiale verso la pellicola, per cui l'ambiente indoor è completamente sanificato entro 1 ora.
5. L'efficienza massima della membrana fotocatalitica (>99%) si ottiene con una luce solare > 109.000 lux, ossia in piena luce (120.000 lux) o con luce solare intensa (111.000 lux) ma l'efficacia in termini di rimozione batterica (99,99%) si raggiunge già dopo 90 minuti di attivazione a 2000 lux, anche con cielo completamente nuvoloso a mezzogiorno, perché il 90% dei raggi UV-A è in grado di attraversare le nuvole e le finestre in vetro.

Le prove sono state effettuate in camera test, in condizioni controllate (volume, illuminamento, temperatura, umidità, velocità dell'aria, livello di inquinamento)

PRINCIPIO DELLE PROVE

Obiettivo delle prove è di verificare l'efficacia delle pellicole inserite in un ambiente INDOOR, come un'aula scolastica, inquinato di polveri PM e formaldeide. Le concentrazioni di inquinanti generate rispecchiano quelle mediamente rilevabili in un'aula (100-150 µg/m³ PM1, 40-60µg/m³ HCHO). L'assenza di persone all'interno dell'ambiente di prova elimina un possibile interferente. Non sono state effettuate prove dell'efficienza delle pellicole sull'abbattimento di cariche batteriche in aria e sulle superfici:

1. Dopo avere effettuato un bianco di campo (assenza dell'inquinante), viene somministrato l'inquinante all'interno della stanza di prova (porte e finestre chiuse). Al raggiungimento di una concentrazione stabilita la somministrazione viene interrotta. La concentrazione dell'inquinante inizia quindi a diminuire (decadimento), in modo lineare (coefficiente R² >0,9), più o meno

velocemente a seconda del ricambio d'aria in atto in quell'ambiente. L'andamento cambia di pendenza se a un certo punto viene aumentato o diminuito il ricambio d'aria oppure se viene attivato un sistema di abbattimento.

2. Viene somministrato l'inquinante all'interno della stanza di prova (porte e finestre chiuse) sino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio, in queste condizioni, pur continuando a somministrare inquinante, la sua concentrazione rimane stabile. Aumentando o diminuendo il ricambio d'aria oppure attivando un sistema di abbattimento cambiano di conseguenza le condizioni di equilibrio.

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Formaldeide	Aero Laser AL 4021
Polveri PM	Grimm 11-d
Microclima	Delta Ohm HD32.3
Illuminamento	Testo 545
Generatore di fumo	Bastoncini di incenso
Generatore HCHO	Pannelli MDF e truciolare

Fig.2 – camera allestita per prove con formaldeide



Fig.3 – attivazione pellicole al sole



Fig.4 – camera allestita per prove con PM

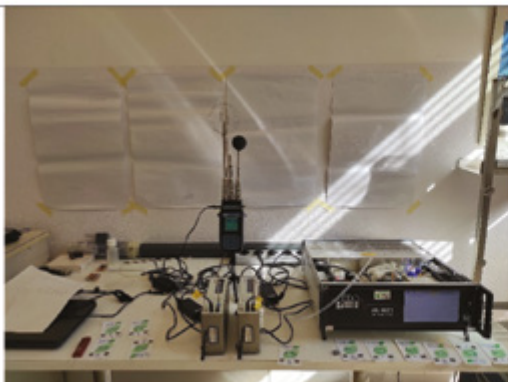
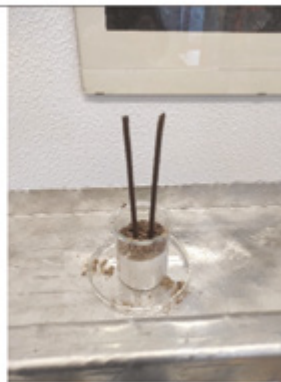


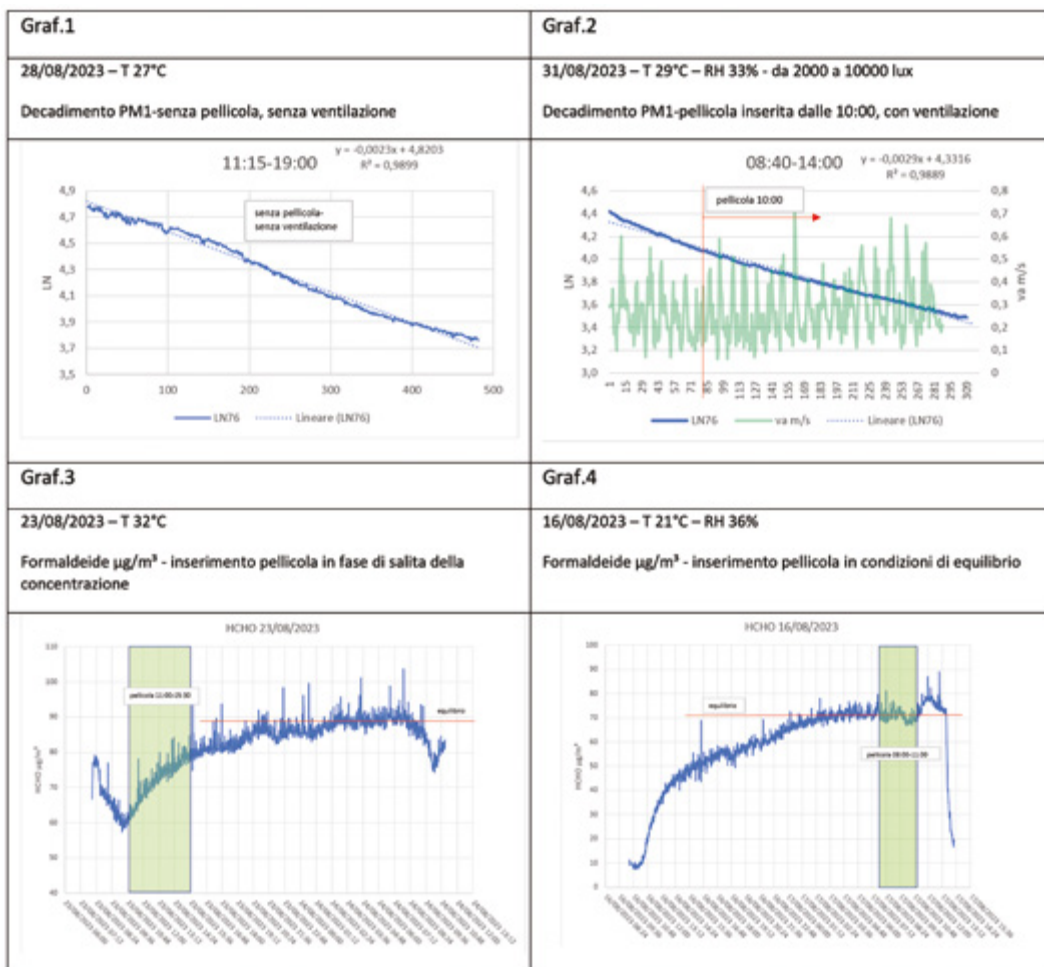
Fig.5 – generatore di fumo



PROCEDIMENTO

1. Le pellicole vengono lasciate al sole per circa 1:30, la stanza viene abbondantemente ventilata. Durante la prima prova (Graf.1), con porte e finestre chiuse, viene acceso un incenso, il fumo si diffonde con un ventilatore all'interno della stanza. Al termine della combustione, dopo circa 15 min, la concentrazione di PM1 è intorno ai 150 µg/m³. viene spento il ventilatore e si monitora il completo decadimento del PM. Nella seconda prova (Graf.2), al termine della combustione, il ventilatore rimane in funzione, dopo circa 1:30 dall'inizio del decadimento vengono applicate le pellicole alle pareti e si monitora il completo decadimento del PM1 (<1µg/m³). I valori registrati vengono elaborati secondo la ISO 16000-8.

2. La stanza viene abbondantemente ventilata. Vengono inseriti dei pannelli in MDF e truciolare. A porte e finestre chiuse inizia il monitoraggio, la concentrazione di formaldeide inizia a salire gradualmente fino a raggiungere le condizioni di equilibrio dopo circa 11h-14h. Durante la prima prova (Graf.3) le pellicole vengono applicate alle pareti per circa 4h all'inizio, poco dopo la chiusura di porte e finestre. Durante la seconda (Graf.4) prova le pellicole vengono applicate per circa 3h al raggiungimento delle condizioni di equilibrio.



NOTE

1. Le pellicole vengono lasciate al sole per circa 1:30, la stanza viene abbondantemente ventilata. Durante la prima prova (Graf.1), con porte e finestre chiuse, viene acceso un incenso, il fumo si diffonde con un ventilatore all'interno della stanza. Al termine della combustione, dopo circa 15 min, la concentrazione di PM1 è intorno ai 150 µg/m³. viene spento il ventilatore e si monitora il completo decadimento del PM. Nella seconda prova (Graf.2), al termine della combustione, il ventilatore rimane in funzione, dopo circa 1:30 dall'inizio del decadimento vengono applicate le pellicole alle pareti e si monitora il completo decadimento del PM1 (<1µg/m³). I valori registrati vengono elaborati secondo la ISO 16000-8.

2. La stanza viene abbondantemente ventilata. Vengono inseriti dei pannelli in MDF e truciolare. A porte e finestre chiuse inizia il monitoraggio, la concentrazione di formaldeide inizia a salire gradualmente fino a raggiungere le condizioni di equilibrio dopo circa 11h-14h. Durante la prima prova (Graf.3) le pellicole vengono applicate alle pareti per circa 4h all'inizio, poco dopo la chiusura di porte e finestre. Durante la seconda (Graf.4) prova le pellicole vengono applicate per circa 3h al raggiungimento delle condizioni di equilibrio.

COMMENTI

Nelle condizioni di prova utilizzate, non risulta che l'inserimento delle pellicole fotocatalitiche abbia portato a variazioni apprezzabili degli andamenti del PM1 in regressione e della formaldeide in condizioni di equilibrio. A nostro parere il principio che permette al diossido di titanio di abbattere certi composti è stato testato solo a livello di laboratorio (e accertato che funziona). Non è stata verificata la sua efficacia in condizioni reali di utilizzo, dove il tempo per svolgere il suo lavoro è molto più breve di quello che in realtà gli servirebbe.

Come già riportato al cap. "PRINCIPIO DELLE PROVE" non sono state effettuate prove dell'efficienza delle pellicole sull'abbattimento di cariche batteriche in aria e sulle superfici.

6.4.10 Conclusioni

Le prove condotte nel Laboratorio dell'aria - "camera test" hanno permesso di trarre una serie di indicazioni concrete sull'efficacia della aerazione, della ventilazione meccanica e di specifiche tecnologie aggiuntive nella gestione della qualità dell'aria indoor.

1. Aerazione: l'apertura delle finestre incide in modo determinante sull'età media dell'aria e sul numero di ricambi/ora. In particolare:

- l'apertura combinata di anta e vasistas consente il ricambio più rapido, riducendo l'età media dell'aria a pochi minuti e limitando il raffreddamento delle pareti rispetto a strategie meno efficaci;
- la sola apertura dei vasistas, pur garantendo un certo ricambio, risulta meno efficiente, allunga l'età media dell'aria e comporta maggior raffreddamento delle superfici interne;
- la progettazione delle superfici apribili (dimensioni, numero, posizione in altezza) è cruciale: ambienti con poche e mal posizionate finestre apribili mostrano ricambi d'aria difficoltosi, specialmente nei periodi caldi, anche lasciando le finestre aperte per lunghi periodi.

2. Prestazioni effettive della VMC. Le misure di portata effettuate in condizioni reali d'uso evidenziano che:

- le portate ai manicotti, con macchina configurata a 80 m³/h dichiarata, risultano inferiori (circa 70 m³/h);
- la portata effettiva percepita dall'utente nella stanza, calcolata tramite decadimento di CO₂, è ulteriormente ridotta (≈ 78% della portata nominale, ≈ 90% della portata misurata al manicotto);
- per il particolato fine (PM 0,2 µm), la portata effettiva risulta circa l'88% della portata nominale, in linea o leggermente inferiore rispetto a quella misurata al manicotto.

Ciò dimostra che la misura della portata deve essere eseguita nelle reali condizioni di esercizio (compresa la cover, le perdite di carico del sistema, lo stato dei filtri) e che le stime basate unicamente sui dati di targa rischiano di sovrastimare l'effettiva ventilazione a disposizione degli occupanti.

Nella progettazione della macchina bisogna tenere conto anche delle differenze fra portata nominale e portata locale

3. Efficacia della VMC su diversi inquinanti

La VMC si è dimostrata:

- **efficace nel contenere la CO₂** generata dalle persone, mantenendo le concentrazioni di equilibrio più basse (sotto 800 ppm, rispetto a valori > 1000 ppm senza VMC) e riducendo l'età media dell'aria;
- **più efficace nella diluizione del particolato fine (< 0,5 µm)** prodotto dalla combustione di incenso, accelerando il decadimento delle concentrazioni rispetto alla condizione senza VMC;
- **meno efficace nella diluizione di CO₂ e formaldeide** a causa della loro tendenza a stratificare verso il basso.
- **meno efficace sulle particelle grossolane (> 3 µm)**, generate da attività di pulizia e movimento: queste particelle hanno una permanenza in aria relativamente breve, tendono a decadere rapidamente per sedimentazione e non si distribuiscono in modo omogeneo nello spazio; la presenza o meno della VMC incide poco sull'andamento dei picchi impulsivi;
- **di efficacia limitata sulle emissioni impulsive di vapori** (es. sigaretta elettronica), dove la componente prevalente condensa rapidamente in particelle più grandi, con decadimento veloce pressoché indipendente dalla VMC.

Nel complesso, la VMC dà un contributo significativo nel controllo degli inquinanti che si distribuiscono in modo omogeneo nel volume (CO₂, PM fini, in parte formaldeide e VOC), mentre incide poco sulle emissioni localizzate e di breve durata di particelle grossolane o di vapore.

4. Comportamento differenziato di CO₂, formaldeide e PM

Le prove hanno evidenziato che:

- la CO₂ e la formaldeide tendono a **stratificare verso il basso**, per via della maggiore densità rispetto all'aria, influenzando così il calcolo delle portate effettive in funzione dell'altezza di campionamento;
- il particolato fine (< 0,5 µm) mostra una **distribuzione più omogenea** in tutto il volume, rendendo le misure via decadimento particolarmente rappresentative del ricambio d'aria medio;

- le differenze osservate nelle portate calcolate via decadimento di CO₂ rispetto a quelle derivate dal PM 0,2 µm trovano spiegazione proprio nelle differenti proprietà fisiche e dinamiche di questi inquinanti.

5. Pellicole fotocatalitiche al TiO₂

Nelle condizioni di prova adottate (concentrazioni realistiche di PM1 e formaldeide, illuminamento e attivazione conforme alle indicazioni del produttore), l'applicazione delle pellicole fotocatalitiche alle pareti non ha comportato:

- variazioni apprezzabili nella pendenza del decadimento del PM1;
- modifiche evidenti alle condizioni di equilibrio della formaldeide, né quando le pellicole sono state applicate all'inizio della prova, né quando sono state introdotte al raggiungimento dell'equilibrio.

Alla luce di questi risultati, nelle condizioni sperimentali considerate, non si è potuta evidenziare un'efficacia significativa delle pellicole nel ridurre PM1 e formaldeide in aria. Non sono state invece oggetto di prova le loro eventuali prestazioni sull'abbattimento di cariche batteriche su superfici e in aria.

6. Implicazioni pratiche per la gestione degli edifici scolastici

Le osservazioni condotte nella camera test, integrate dall'esperienza di campo, suggeriscono che:

- la **progettazione delle aperture finestrate** (dimensione, numero, posizione) è fondamentale per ottenere ricambi rapidi con il minimo impatto energetico;
- la **corretta progettazione, regolazione e manutenzione della VMC** è essenziale: scarsa manutenzione (es. filtri ostruiti per anni) può compromettere drasticamente portata ed efficacia, fino a situazioni paradossali in cui l'impianto reimmette integralmente l'aria viziata senza apporto di aria esterna;
- la VMC va considerata uno strumento efficace per tenere sotto controllo CO₂, particolato fine e alcuni VOC, ma **non può sostituire** buone pratiche di ventilazione naturale e una corretta gestione delle sorgenti di inquinamento (materiali, prodotti di pulizia, comportamenti).

In sintesi, il "laboratorio dell'aria" ha confermato che:

- l'efficacia della ventilazione, naturale o meccanica, dipende in modo critico dalla configurazione geometrica dell'ambiente, dalle reali portate disponibili e dalle caratteristiche degli inquinanti presenti;
- la misura dell'**età media locale dell'aria**, integrata con il monitoraggio di CO₂, PM e formaldeide, rappresenta un indicatore particolarmente utile e "leggibile" per valutare lo stato di ventilazione di un ambiente indoor dal punto di vista igienistico;

strumenti semplici come il corretto uso delle finestre, combinati con una **VMC ben progettata e mantenuta**, risultano, nelle condizioni studiate, più determinanti per la qualità dell'aria rispetto a soluzioni di tipo "passivo" la cui efficacia, come nel caso delle pellicole fotocatalitiche, non è risultata comprovata nelle specifiche condizioni di prova.

7. Rating per le diverse soluzioni per la qualità dell'aria nelle scuole

- ▶ *Costanzo Di Perna - Università Politecnica delle Marche*
- ▶ *Clara Peretti - Consulente Provincia autonoma di Bolzano*

La scelta del sistema di ventilazione per le aule scolastiche incide in modo determinante sulla qualità dell'aria interna (IEQ – Indoor Environmental Quality), sul comfort acustico e sui costi complessivi di intervento (investimento iniziale, opere accessorie, progettazione).

Sulla base dei risultati delle installazioni nella Regione Marche e nelle installazioni del progetto

Le tabelle di seguito riportate mettono a confronto quattro famiglie di soluzioni:

- **VMC centralizzata con distribuzione completa mandata/estrazione**, esterna all'aula.
- **VMC centralizzata con sola mandata in aula e prelievo unico**, esterna all'aula.
- **Unità decentrate in aula**, senza canalizzazione.
- **Purificatori d'aria portatili**, in aula.

Per ciascuna tipologia vengono valutati:

- **Range di costo** dell'intervento;
- **Complessità di progettazione** e quota di costi legati a opere edili, distribuzione, macchina VMC, progettazione;
- **Caratteristiche tecniche di base** (posizione dell'unità, presenza di canalizzazioni);
- **Prestazioni attese in termini di IEQ**, in particolare:
 1. tasso di ventilazione di esercizio (volumi/ora),
 2. comfort acustico,
 3. efficienza di ventilazione;
- **Classe di qualità dell'aria interna secondo UNI EN 16798-1**, espressa come classe attesa di concentrazione di CO₂, garantita per almeno l'85% del tempo scolastico.

Questa analisi sintetica consente ai decisori (enti locali, dirigenti scolastici, progettisti) di valutare per ogni opzione il compromesso tra investimento economico, complessità di realizzazione e livello di qualità dell'aria realmente raggiungibile in esercizio.

Tabella 5. VMC rating per le diverse soluzioni

Range di costo	Complessità di progettazione	Ripartizione costi	Tipologia	IEQ	Classe UNI EN 16798-1 attesa (range CO ₂)*
Da 10.000 a 13.000	Elevata	20% opere edili 30% distribuzione 40% costo VMC 10% progettazione	VMC esterna all'aula con sistema di distribuzione	Tasso di ventilazione di esercizio fino a 3,5 vol/h, comfort acustico rispettato, efficienza di ventilazione elevata	I
Da 4.000 a 10.000	Media	20% opere edili 20% distribuzione 50% costo VMC 10% progettazione	VMC esterna all'aula con sistema di distribuzione per la sola mandata (prelievo unico)	Tasso di ventilazione di esercizio fino a 2 vol/h, comfort acustico rispettato, efficienza di ventilazione buona	II
Fino a 4.000 Euro	Ridotta	10% opere edili 85% costo VMC 5% progettazione	Decentrata in aula (senza canalizzazione) installato a parete o soffitto	Tasso di ventilazione di esercizio: 1 vol/h, con tasso elevato riduzione comfort acustico, efficienza di ventilazione media	III

* classe di concentrazione garantita per l'85% del tempo scolastico

Tabella 6. Purificatori, rating

Range di costo	Complessità di progettazione	Ripartizione costi	Tipologia	IEQ	Classe UNI EN 16798-1 attesa (range CO ₂)*
Fino a 5.000 Euro (purificatori)	Nessuna	100% prodotto	Purificatore in aula	Può avere effetto solo su polveri e TVCO, non riduce CO ₂ , assenza di rinnovo dell'aria	NA

- **Più si scende di costo e complessità, più si arretra di classe IEQ:** dalla classe I, con VMC centralizzata ben progettata, si passa progressivamente a prestazioni inferiori fino ai purificatori, che non garantiscono alcun livello di controllo sulla CO₂.
- **La progettazione è un investimento necessario:** nelle soluzioni più efficaci la quota progettuale è esplicita (circa 10%) e giustificata dalla necessità di dimensionare correttamente portate, distribuzione e acustica. Non eseguire un'ideonea progettazione porta a impianti meno performanti o mal utilizzati.
- **Distribuzione dell'aria e comfort acustico fanno la differenza:** i sistemi canalizzati con buona distribuzione garantiscono maggiore omogeneità di ventilazione e permettono di raggiungere portate più alte senza compromettere il rumore in aula, aspetto cruciale per la didattica.
- **Purificatori:** non possono sostituire né l'aerazione né la ventilazione meccanica quando l'obiettivo è il ricambio dell'aria ovvero il rispetto delle classi definite da UNI EN 16798 1.



8. Analisi socio-economica del progetto di installazione di impianti di ventilazione controllata nelle scuole marchigiane: l'approccio metodologico

- ▶ *Marco Giuliani - Dipartimento di management – Università Politecnica delle Marche*
- ▶ *Michele Guidi - Università Politecnica delle Marche*
- ▶ *Agnese Sabbatucci - Università Politecnica delle Marche*

8.1 Introduzione

Negli ultimi anni, la qualità dell'aria all'interno delle scuole è diventata una questione di crescente interesse per la salute pubblica e il benessere psicofisico. Gli edifici scolastici rappresentano, infatti, ambienti particolarmente sensibili poiché gli studenti, gli insegnanti e tutto il personale coinvolto trascorrono molte ore al loro interno, respirando un'aria che può avere ripercussioni significative sia sulla salute che sulle prestazioni cognitive.

In questo contesto, la Regione Marche ha proposto e avviato un progetto volto all'installazione di sistemi di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC) in alcune scuole del territorio.

Il presente studio mira a rappresentare una metodologia di analisi utile a valutare gli impatti socio-economici dell'installazione di impianti di ventilazione meccanica controllata (VMC) in aule scolastiche, adottando due approcci distinti: uno statistico e uno economico. Sebbene il modello proposto sia tarato per uno specifico contesto, ossia l'ambito scolastico, idealmente, previa opportuni adattamenti, potrebbe essere implementato anche in altri ambiti.

La metodologia descritta permette di comprendere se esiste un legame statisticamente significativo tra l'installazione di sistemi di VMC e i possibili benefici da questo generati nonché, ove tale legame esista, la convenienza economica ad installare e gestire tali impianti.

Seguendo questo approccio strutturato, si ritiene di poter offrire un contributo concreto agli enti gestori, supportando sia la fase decisoria dell'investimento sia la fase di mantenimento, nonché alle scuole e agli utenti per comprendere meglio l'importanza e il valore complessivo, ossia economico, sociale e ambientale dell'investimento, superando gli ovvi limiti del solo costo economico.

8.2 La qualità dell'aria indoor

L'analisi della letteratura sulla valutazione dei progetti di installazione di sistemi di VMC negli edifici scolastici evidenzia come il livello di qualità dell'aria indoor sia un elemento centrale e determinante. Negli ambienti chiusi, in particolare nelle scuole, la qualità dell'aria assume una rilevanza particolare poiché influenza direttamente il benessere e la salute di studenti e personale. Sundell (2004) evidenzia come la qualità dell'aria interna sia stata considerata un fattore ambientale cruciale per oltre un secolo, fino a quando i problemi legati all'ambiente esterno non hanno preso il sopravvento, divenendo la questione principale. Nonostante ciò, l'aria all'interno degli ambienti chiusi resta un'importante fonte di esposizione per l'uomo: più della metà dell'aria inalata durante l'arco della vita proviene dagli spazi abitativi. Si stima, infatti, che le persone trascorrono circa il 90% del proprio tempo in ambienti chiusi. Inoltre, i giovani sembrano essere molto più suscettibili agli inquinanti ambientali rispetto alle persone in età adulta.

Nei Paesi industrializzati, una scarsa qualità dell'aria indoor è collegata a una serie di problematiche sanitarie, come allergie, infezioni respiratorie e, in alcuni casi, tumori. In particolare, il cancro ai polmoni risulta strettamente legato all'esposizione al gas radon (Rn), mentre allergie, infezioni e la "Sindrome dell'Edificio Malato" sono frequentemente associate a condizioni di umidità

elevata e scarsa ventilazione. In effetti, una bassa qualità dell'aria indoor può essere associata alla cosiddetta "SBS - Sick Building Syndrome" (World Health Organization, 1982), termine definito dall'Organizzazione Mondiale della Sanità nel 1982. La Sindrome dell'Edificio Malato (SBS) identifica un complesso spettro di sintomi che possono insorgere tra gli occupanti di uffici, edifici pubblici, scuole e ospedali. I sintomi tipici includono irritazione delle mucose, asma, effetti neurotossici, disturbi gastrointestinali, secchezza della pelle e sensibilità agli odori. La SBS è attribuibile a una combinazione di fattori, tra cui la qualità dell'aria interna, le caratteristiche strutturali dell'edificio, il livello di umidità e le attività svolte all'interno degli spazi. Tali condizioni sono divenute sempre più diffuse dagli anni '70 ad oggi e spesso provengono da persone che trascorrono la maggior parte del proprio tempo in ufficio, in edifici scolastici, in ospedali o nel proprio appartamento. I sintomi da SBS non dovrebbero essere sottovalutati, in quanto presentano un impatto potenziale significativo sulla vita delle persone che ne sono affette, risultando invalidanti e rendendo interi luoghi di lavoro non funzionali. Infatti, sono presenti buone evidenze per ritenere che la scarsa qualità dell'aria e i sintomi provocati dalla SBS come mal di testa frequenti e affaticamento, possano influire negativamente sulle prestazioni umane. È inoltre importante considerare che la qualità dell'aria interna negli edifici è il risultato dell'interazione di numerosi fattori, come il sistema di ventilazione e la presenza di elementi microbiologici, tossicologici e fisici. Questa complessa combinazione rende l'analisi della qualità dell'aria un fenomeno articolato, difficile da valutare nella sua completezza.

8.3 La qualità dell'aria negli edifici scolastici e le sue implicazioni

Mentre per gli edifici pubblici la letteratura offre un'ampia varietà di studi, relativamente pochi approfondiscono gli effetti dell'ambiente interno sul benessere e sulla produttività all'interno degli edifici scolastici. Questo rappresenta, tuttavia, un aspetto fondamentale da considerare, poiché la scuola è il luogo in cui i giovani trascorrono gran parte del loro tempo al di fuori delle proprie abitazioni. È quindi essenziale comprendere se, e in che misura, la qualità dell'aria interna negli edifici scolastici influenzi la salute e le performance degli studenti.

La letteratura scientifica ha dedicato diversi studi all'analisi dell'influenza che le condizioni ambientali, e in particolare la qualità dell'aria nelle aule scolastiche, possono avere sul livello di apprendimento degli studenti. In sintesi, emerge una relazione significativa tra la qualità dell'ambiente d'apprendimento e le performance scolastiche, sottolineando come un'aria pulita possa favorire il progresso accademico. Ad esempio, una ricerca ha identificato una correlazione positiva, con un indice di Pearson pari a 0,74, tra l'adeguata ventilazione delle aule e i risultati scolastici di studenti che hanno ottenuto buoni punteggi in test di matematica e lettura. Un ulteriore esperimento condotto presso la Nanyang Technological University (NTU) di Singapore nel 2016 ha confermato che una cattiva qualità dell'aria influenza negativamente il benessere degli studenti e la loro performance scolastica, valutata attraverso tre indicatori: memoria a breve termine, risultati in test di percezione e abilità di calcolo mentale. In condizioni di scarsa qualità dell'aria, infatti, tutte queste performance tendevano a diminuire sensibilmente. Queste evidenze suggeriscono che investire nella qualità dell'aria nelle scuole potrebbe rappresentare un'opportunità importante per migliorare il benessere e l'apprendimento degli studenti.

Un aspetto cruciale da considerare nell'analisi dell'ambiente scolastico è il legame tra frequenza scolastica e qualità dell'aria. La scarsa ventilazione e la presenza di inquinanti all'interno delle scuole possono favorire la diffusione di batteri e patogeni, incrementando il rischio di infezioni respiratorie che causano assenteismo. Tale fenomeno non solo riduce la frequenza scolastica ma incide negativamente anche sul rendimento complessivo degli studenti.

Uno studio condotto da Mendell et al. sottolinea come un ambiente scolastico di bassa qualità, in particolare a causa di inquinanti interni, sia associato a un aumento dell'assenteismo e a una riduzione delle performance scolastiche. La mancanza di frequenza scolastica limita, infatti, la

continuità del trasferimento di informazioni tra docente e studente, penalizzando il processo di apprendimento e aumentando il rischio che lo studente resti indietro.

Ulteriori ricerche evidenziano come l'assenteismo sia particolarmente elevato tra gli studenti che soffrono di asma, allergie o altre patologie respiratorie preesistenti rispetto ai loro compagni sani.

È bene notare che questo fenomeno comporta non solo un impatto negativo sulle performance scolastiche, ma rappresenta anche un costo per la società: i servizi educativi, pur essendo erogati, non vengono fruiti dagli studenti assenti, riducendo così l'efficacia complessiva in termini di costi e benefici. Diverse indagini dimostrano inoltre che le condizioni ambientali negative non incidono esclusivamente sugli studenti, ma possono ridurre anche la produttività dei docenti e del personale scolastico. Questo aspetto è essenziale, poiché un ambiente scolastico inadeguato rischia di compromettere l'efficienza dell'intero sistema educativo.

A supporto dell'importanza di un ambiente salubre, numerosi studi hanno esaminato la correlazione tra qualità dell'aria e frequenza dei congedi per malattia. Un'analisi significativa evidenzia come le malattie respiratorie rappresentino una delle cause principali dei congedi per malattia tra lavoratori. Questo dato è confermato anche da un altro studio, che individua nelle malattie respiratorie la causa predominante dei congedi di breve durata.

La letteratura sottolinea inoltre il legame tra scarsa qualità dell'aria nei luoghi di lavoro e aumento dei giorni di malattia per dipendente, evidenziando come un ambiente interno inadeguato possa incrementare la durata media del congedo di malattia di 1,2–1,9 giorni per persona all'anno. Queste ricerche suggeriscono che migliorare la qualità dell'aria negli ambienti scolastici e lavorativi possa rappresentare un investimento significativo non solo per il benessere individuale, ma anche per l'efficienza complessiva, riducendo i giorni di malattia e sostenendo una produttività continuativa e sostenibile.

Nonostante l'evidenza di studi che suggeriscono una correlazione tra la qualità dell'aria negli edifici scolastici, il benessere psicofisico di studenti e docenti e una maggiore produttività scolastica, la letteratura rimane ancora carente nell'approfondire gli effetti concreti che l'installazione di dispositivi per il miglioramento della ventilazione potrebbe apportare. In particolare, risultano ancora limitati i contributi scientifici volti a sviluppare modelli di valutazione che considerino l'impatto economico, ambientale e sociale dell'installazione di sistemi di ventilazione meccanica controllata all'interno delle strutture scolastiche. Tale mancanza di approfondimento lascia aperti molti quesiti su quali possano essere i reali benefici di queste installazioni, sia per la salute e l'apprendimento che per la riduzione dei costi sociali legati a malattie e assenteismo.

8.4 Metodologia e protocollo d'analisi

Il presente studio adotta due approcci distinti: uno statistico e uno economico.

L'approccio statistico (4.1) prevede l'utilizzo di due modelli differenti per analizzare l'efficacia degli impianti di VMC nel ridurre la trasmissione di malattie nelle scuole. Il primo modello è un'analisi di correlazione, finalizzata a identificare e quantificare la relazione tra la diminuzione della diffusione delle malattie respiratorie e l'installazione degli impianti di ventilazione. Il secondo è un modello Difference-in-Difference, che permette di condurre due tipi di analisi comparative. La prima è un confronto temporale all'interno della stessa aula del campione, analizzando i dati relativi alla situazione prima dell'installazione dell'impianto (ex ante) e quelli successivi alla sua implementazione (ex post). La seconda analisi compara dati di aule statisticamente simili ma con diversi sistemi di ventilazione: una dotata di ventilazione meccanica e l'altra di ventilazione naturale.

L'approccio economico (4.2) si concentra sulla valutazione complessiva del progetto, calcolando il risultato netto come differenza tra il totale dei benefici e il totale dei costi lungo l'intero ciclo di vita dell'impianto. Questo approccio mira a determinare il valore complessivo del progetto, non solo dal punto di vista economico ma anche in termini di benefici sociali per la salute e l'efficienza dell'ambiente scolastico.

8.4.1 L'analisi statistica

L'approccio statistico è volto ad analizzare l'efficacia degli impianti di VMC nel ridurre la trasmissione di malattie nelle scuole. Tale analisi verrà condotta attraverso l'impiego di due modelli: l'analisi di correlazione e l'analisi difference-in-difference.

L'analisi di correlazione

L'analisi di correlazione è una tecnica descrittiva che misura la forza e la direzione della relazione tra due variabili quantitative. Il coefficiente di correlazione di Pearson (r) è il metodo più comune per effettuare un'analisi di correlazione tra due variabili quantitative, ed è un valore che varia tra -1 e +1, dove:

$r = +1$: indica una correlazione perfetta positiva (le variabili aumentano insieme in modo proporzionale)

$r = -1$: indica una correlazione perfetta negativa (una variabile aumenta quando l'altra diminuisce in modo proporzionale)

$r = 0$: indica assenza di correlazione lineare (le variabili non mostrano una relazione lineare).

La formula per calcolare r è:

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

dove \bar{X} e \bar{Y} rappresentano i valori medi delle variabili X e Y .

L'analisi di correlazione è spesso un passo preliminare alla regressione lineare. Infatti, se esiste una correlazione significativa tra due variabili, è probabile che la regressione lineare possa fornire un modello utile per descrivere e prevedere la relazione tra di esse. In sintesi:

- correlazione: descrive la forza della relazione (quanto X e Y variano insieme);
- regressione: crea un modello predittivo che descrive come varia la variabile dipendente (Y) in base alla variabile indipendente (X).

In regressione lineare, il quadrato del coefficiente di correlazione (r^2), noto come coefficiente di determinazione (R^2), rappresenta la percentuale di varianza di Y spiegata da X . Un elevato R^2 indica che il modello di regressione spiega bene la variabilità di Y , mentre un valore basso suggerisce che potrebbero esserci altri fattori influenti. In generale, un'elevata correlazione ($|r|$ vicino a 1) suggerisce che la regressione lineare potrebbe essere un buon modello per la relazione tra X e Y . Al contrario, una bassa correlazione ($|r|$ vicino a 0) indica che probabilmente non esiste una forte relazione lineare, e la regressione lineare potrebbe non essere il modello più utile.

Questa analisi permette di comprendere l'intensità della relazione tra la presenza di impianti di ventilazione meccanica (variabile indipendente X) e la riduzione delle assenze per malattia (variabile dipendente Y), valutando quanto l'intervento possa contribuire a limitare la trasmissione di patologie all'interno delle aule scolastiche.

Tali variabili sono state operazionalizzate come segue. La presenza dell'impianto di ventilazione

meccanica nell'aula è una variabile dummy (o dicotomica) che assume valore 0 in caso di assenza dell'impianto e 1 in caso di presenza dell'impianto. La variabile dipendente Y è stata invece calcolata in base ai numeri di giorni di assenza per malattia degli studenti.

Inoltre, per rafforzare la robustezza dell'analisi sono state aggiunte al modello delle variabili di controllo per isolare con maggiore precisione l'effetto dell'installazione degli impianti di VMC sulle assenze scolastiche. Queste variabili includono la posizione geografica della scuola, l'età degli studenti, la dimensione delle aule e il grado di occupazione delle stesse.

L'unità di analisi è la singola aula scolastica, che permette, quindi, di esaminare come l'installazione dei sistemi di ventilazione incida direttamente sulla frequenza scolastica.

L'analisi difference-in-difference

La stima difference-in-difference è una metodologia utilizzata prevalentemente in ambito microeconomico per stimare l'effetto di un "trattamento" (ad esempio l'introduzione di un provvedimento di policy o di un investimento) su un gruppo di soggetti ("trattati"), relativamente a un secondo gruppo di soggetti non esposti al trattamento (gruppo di "controllo"). I due gruppi vengono osservati in due periodi, uno precedente e uno successivo al trattamento. I dati possono essere ripetizioni di cross section o dati panel. Una volta definito il dataset, il modello di regressione utilizzato per la stima assume la forma seguente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 dB + \delta_0 d2 + \delta_1 d2 dB + u$$

dove y è la variabile di interesse, osservata nei periodi 1 e 2; d2 è una variabile dummy che assume valore 1 nel secondo periodo e 0 altrimenti; dB è una variabile dummy che assume valore pari a 1 nel caso dei soggetti "trattati" e 0 altrimenti. In altri termini, quest'ultima variabile coglie le possibili differenze a priori tra il gruppo trattato e il gruppo di controllo. La variabile d2dB rappresenta l'interazione tra d2 e dB e assume valore 1 in corrispondenza dei soggetti del gruppo dei trattati nel secondo periodo. Il parametro di interesse, cioè quello che esprime l'effetto del trattamento sui trattati, è proprio il coefficiente relativo a quest'ultima variabile (δ_1) che indica il termine di errore. Da quanto sopra, la stima difference-in-difference sarà pari a:

$$\delta_1 = (y_{B,2} - y_{B,1}) - (y_{A,2} - y_{A,1})$$

L'approccio descritto consente di isolare l'effetto specifico dell'installazione dei sistemi di VMC e di valutare le sue conseguenze in termini di assenze per malattia tra gli studenti. In questo ambito, sono state condotte due comparazioni distinte:

1. Comparazione temporale all'interno della stessa aula: si esamineranno i dati relativi a due periodi distinti per ciascuna aula, chiamati "time 1" e "time 2". Nel "time 1" (periodo precedente all'installazione dell'impianto VMC) si registreranno le assenze per malattia, rappresentate dalla variabile dipendente Y, per poi confrontarle con quelle del "time 2" (periodo successivo all'installazione e funzionamento dell'impianto VMC). Questo confronto permette di osservare come varia il numero di assenze per malattia degli studenti con il passaggio dal sistema di ventilazione naturale a quello meccanico.
2. Comparazione tra aule con diversa tipologia di ventilazione: si confronteranno i dati relativi a un'aula dotata di impianto VMC e un'aula simile con sola ventilazione naturale. Anche in questo caso, l'attenzione è rivolta alle variazioni della variabile Y, ossia i giorni di assenza per malattia, per osservare se e come il tipo di ventilazione influenzi la frequenza di assenteismo per motivi di salute.

8.4.2 L'analisi economica

L'analisi economica del progetto di installazione di impianti di VMC nelle aule scolastiche permette di valutare gli impatti economici complessivi di tale intervento. Una corretta valutazione richiede infatti di considerare non solo i costi di capitale iniziali e i costi energetici associati, ma anche gli effetti sulla performance e sul benessere degli studenti, aspetti che, come suggerito da Ugolini, necessitano di essere monetizzati e inclusi nell'analisi.

La valutazione si è concentrata sulle tre dimensioni fondamentali della sostenibilità ossia:

1. **Aspetto economico:** comprende l'analisi di tutti i costi e i benefici monetari, diretti e indiretti, associati all'implementazione del progetto.
2. **Aspetto sociale:** considera l'impatto sulla sfera personale degli studenti e dei docenti, come beneficiari diretti della misura.
3. **Aspetto ambientale:** include variabili legate alla riqualificazione energetica dell'edificio, contribuendo a un miglioramento sostenibile delle strutture scolastiche.

L'analisi economica si basa su un modello di analisi costi-benefici - CBA (Cost Benefit Analysis) – che permette di quantificare i benefici diretti e indiretti generati dal progetto. La CBA parte dal presupposto che a ogni elemento del progetto possa essere associato un valore monetario, e che questi valori possano essere stimati in base al mercato. Questo approccio offre uno strumento efficace per il processo decisionale, poiché permette di confrontare i costi e benefici, facilitando così la scelta tra attuare o rinunciare a un intervento. Un vantaggio distintivo della CBA è che, a differenza delle tecniche di valutazione degli investimenti tradizionali, che si concentrano principalmente sui flussi finanziari in entrata e in uscita, la CBA considera un'ampia gamma di fattori, traducendo in termini monetari sia i benefici sia i costi complessivi, includendo impatti economici, sociali e ambientali. Nel caso in esame, la CBA risulta particolarmente utile per rispondere alla domanda se e quale progetto, tra diverse alternative, rappresenti l'investimento ottimale.

Onde avere un'analisi quanto più completa possibile, si è adottata una prospettiva basata sul ciclo di vita del progetto (LCC - Life Cycle Cost). Il LCC, infatti, è una metodologia che permette di valutare l'impatto economico di un progetto lungo l'intero ciclo di vita, risultando particolarmente utile per il progetto in esame. Questa tecnica considera tutti i costi (e i benefici) associati a un prodotto o servizio, dal suo sviluppo iniziale e produzione fino all'utilizzo e allo smaltimento finale. Attraverso una valutazione completa dei costi, il LCC consente di stimare le spese complessive del progetto, aiutando così a prendere decisioni di acquisto o investimento tra diverse alternative. Un approccio di LCC promuove una visione di lungo termine nel processo decisionale. Piuttosto che orientarsi verso soluzioni che comportino un minore costo iniziale ma che possano rivelarsi meno efficienti sul lungo periodo, questa metodologia incoraggia a considerare i benefici economici complessivi, inclusi i costi di gestione, manutenzione e smaltimento. Ciò permette di valutare il reale valore di un investimento, favorendo scelte che, sebbene possano comportare costi iniziali più elevati, risultano più vantaggiose e sostenibili nel tempo.

L'approccio LCC è strettamente correlato al concetto di TCO (Total Cost of Ownership). Il TCO è uno strumento che permette di comprendere il costo complessivo legato all'acquisto di un bene o servizio da un fornitore specifico, identificando i principali elementi di costo associati a un investimento chiave. In altre parole, il TCO considera non solo il prezzo iniziale di acquisto, ma anche i costi di utilizzo, manutenzione e gestione associati, adottando una prospettiva di lungo termine.

Il modello di analisi ha suddiviso i benefici attesi in tre categorie principali, ognuna delle quali mira a quantificare l'impatto positivo dell'installazione dei sistemi VMC nelle scuole.

Di seguito, i dettagli di ciascun beneficio:

1. Beneficio relativo alla riduzione delle assenze degli studenti e degli insegnanti

L'installazione di sistemi di VMC ha un effetto diretto sulla qualità dell'aria all'interno degli ambienti scolastici, contribuendo a ridurre la diffusione di malattie respiratorie e infezioni virali. Questo beneficio è particolarmente importante per il contesto scolastico, dove il rischio di contagio è elevato e le malattie stagionali possono determinare significative assenze.

Per quantificare il risparmio associato alla riduzione delle assenze, sono stati identificati i seguenti indicatori:

- **Importo delle tasse scolastiche:** rappresentano un costo che le famiglie sostengono, ma che non viene completamente valorizzato in caso di assenze. Con una riduzione delle assenze, gli studenti fruiscono pienamente del servizio educativo, valorizzando così le risorse investite
- **Costi diretti e indiretti associati alle malattie:** comprendono sia i costi diretti, ovvero le spese sanitarie a carico del Sistema Sanitario Nazionale (SSN), come visite mediche, medicinali e ospedalizzazioni, sia i costi indiretti, intesi come la quota media di spesa che il Governo copre per ogni consultazione medica, rappresentando un costo sanitario sociale legato all'assenza per malattia degli studenti. La media ponderata di questi costi, calcolata su studi accademici specifici, permette di stimare il risparmio economico derivante dalla minore incidenza di malattie grazie ai sistemi di VMC
- **Beneficio legato all'assistenza domiciliare:** per gli studenti più giovani, è stato incluso nel modello il costo dell'assistenza personale domiciliare (es. baby-sitter), figura necessaria per prendersi cura degli studenti nei giorni di malattia. Tale costo è stato adottato in quanto agevolmente parametrabile e più stabile e significativa rispetto alla mancata produttività di un familiare che dovrebbe lasciare il lavoro o altra attività per assistere il bambino (e quindi godere di permessi, ferie, ecc. e impattare sull'economia dell'azienda per cui lavora con conseguente forte variabilità dell'impatto a seconda di numerosi parametri). Su questo punto si evidenzia che non è stato quantificato il minor rischio di contagio familiare (come la trasmissione da figlio a genitore o da nipote a nonni) a causa dell'assenza di dati puntuali e dell'estrema variabilità dei contesti familiari, resta fondamentale sottolineare la rilevanza di questa dimensione. Infatti, la riduzione della trasmissibilità di agenti patogeni in ambienti scolastici potrebbe avere un effetto a catena benefico anche al di fuori della scuola, limitando il rischio di contagio verso i nuclei familiari degli studenti. Su questa linea, un aspetto particolarmente significativo riguarda il potenziale beneficio per i membri familiari anziani o fragili. Infatti, In queste categorie, un'infezione respiratoria, spesso considerata lieve nei più giovani, può avere effetti decisamente più gravi, portando a complicazioni mediche che richiedono cure intensive e, in alcuni casi, ospedalizzazione. Si evidenzia come il rischio di infezioni ospedaliere è significativamente maggiore tra i pazienti anziani, risultando da tre a cinque volte superiore rispetto ai pazienti più giovani. In questi casi, il contagio non si limita a rappresentare un problema sanitario personale, ma genera anche un impatto economico per il sistema sanitario nazionale, poiché aumentano i costi medici e assistenziali necessari per la cura di tali soggetti.
- **Beneficio per mancata assenza di personale docente:** un'ulteriore variabile considerata nell'analisi è il numero di giorni di assenza per malattia del personale docente. La monetizzazione di questa variabile è avvenuta calcolando lo stipendio giornaliero del docente e includendo le eventuali spese mediche associate alle assenze.

2. Beneficio potenziale relativo alla riduzione dei consumi di energia/riscaldamento

L'adozione di sistemi VMC comporta potenziali benefici sul fronte energetico. In un contesto scolastico, il mantenimento di un'adeguata qualità dell'aria spesso richiede l'apertura delle finestre, specialmente nei mesi invernali, determinando dispersione di calore e aumento dei consumi di riscaldamento. Gli impianti di ventilazione meccanica consentono di garantire un costante ricambio d'aria senza necessità di aprire le finestre, mantenendo così la temperatura interna e riducendo la domanda energetica per il riscaldamento.

Questo beneficio è stato valorizzato attraverso tre indicatori principali:

- Consumo energetico dell'impianto (kWh): rappresenta il fabbisogno energetico per il funzionamento dei sistemi VMC;
 - Spese per energia: il modello tiene conto del costo energetico unitario, per stimare l'impatto complessivo dell'intervento;
 - Spese di riscaldamento: stimando il risparmio in termini di riscaldamento, si è quantificato l'effetto positivo della riduzione della dispersione termica ottenuta con i sistemi VMC.
- Il risparmio energetico complessivo è calcolato come somma dei risparmi su questi tre indicatori, offrendo un dato quantificabile in termini di riduzione dei costi operativi dell'edificio.

3. Beneficio derivante dalla riduzione delle risorse pubbliche non fruite per effetto delle assenze

L'assenza di studenti dovuta a malattia implica un mancato utilizzo del servizio educativo, che viene comunque erogato ma non fruito dagli studenti assenti. In dettaglio, per ogni studente che non frequenta la scuola a causa di malattia, lo Stato continua a sostenere i costi dell'istruzione, che includono le spese per strutture, personale e risorse didattiche, senza che l'investimento produca un ritorno effettivo.

In questa categoria, sono stati considerati i seguenti indicatori:

- Costo medio annuale del servizio scolastico per studente: utilizzando i dati provenienti dalla Circolare n. 3363 del 23 gennaio 2024 del Ministero dell'Istruzione, è stato calcolato il costo giornaliero per studente, differenziato per ordine e grado scolastico. Questo dato consente di stimare il valore della risorsa pubblica sprecata per ogni giorno di assenza.
- Produttività dello studente: si evidenzia che tra i benefici potrebbero essere annoverati anche quelli legati al rendimento scolastico e al benessere degli studenti. Tali elementi vengono monetizzati correlando i giorni di assenza con il potenziale stipendio iniziale post-laurea degli studenti.

Considerato che tale impatto è di lungo termine e fortemente volatile essendo influenzato da numerose variabili economiche, sociali e ambientali, si è preferito non includerlo nell'analisi onde avere dati maggiormente stabili.

Per stimare il beneficio derivante dalla riduzione delle assenze, il modello confronta:

- Spesa pubblica non fruita con VMC: calcolata moltiplicando il numero di assenze (per tipologia di scuola) con il costo medio giornaliero per studente, nelle aule dotate di VMC.
- Spesa pubblica non fruita senza VMC: stima il costo in uno scenario ipotetico in cui le aule non siano dotate di ventilazione meccanica, permettendo un confronto tra i due scenari.

Relativamente ai **costi**, sono stati individuati i seguenti elementi utili a garantire una valutazione completa e accurata:

- Costo iniziale del capitale: include tutte le spese relative all'acquisto, all'installazione e al finanziamento dell'impianto.
- Costi operativi e di manutenzione: copre tutte le spese legate all'uso e alla manutenzione dell'impianto durante la sua vita utile.
- Costo di smaltimento: comprende le spese finali legate alla dismissione dell'impianto, compreso il trattamento e il riciclo delle componenti, se applicabile.

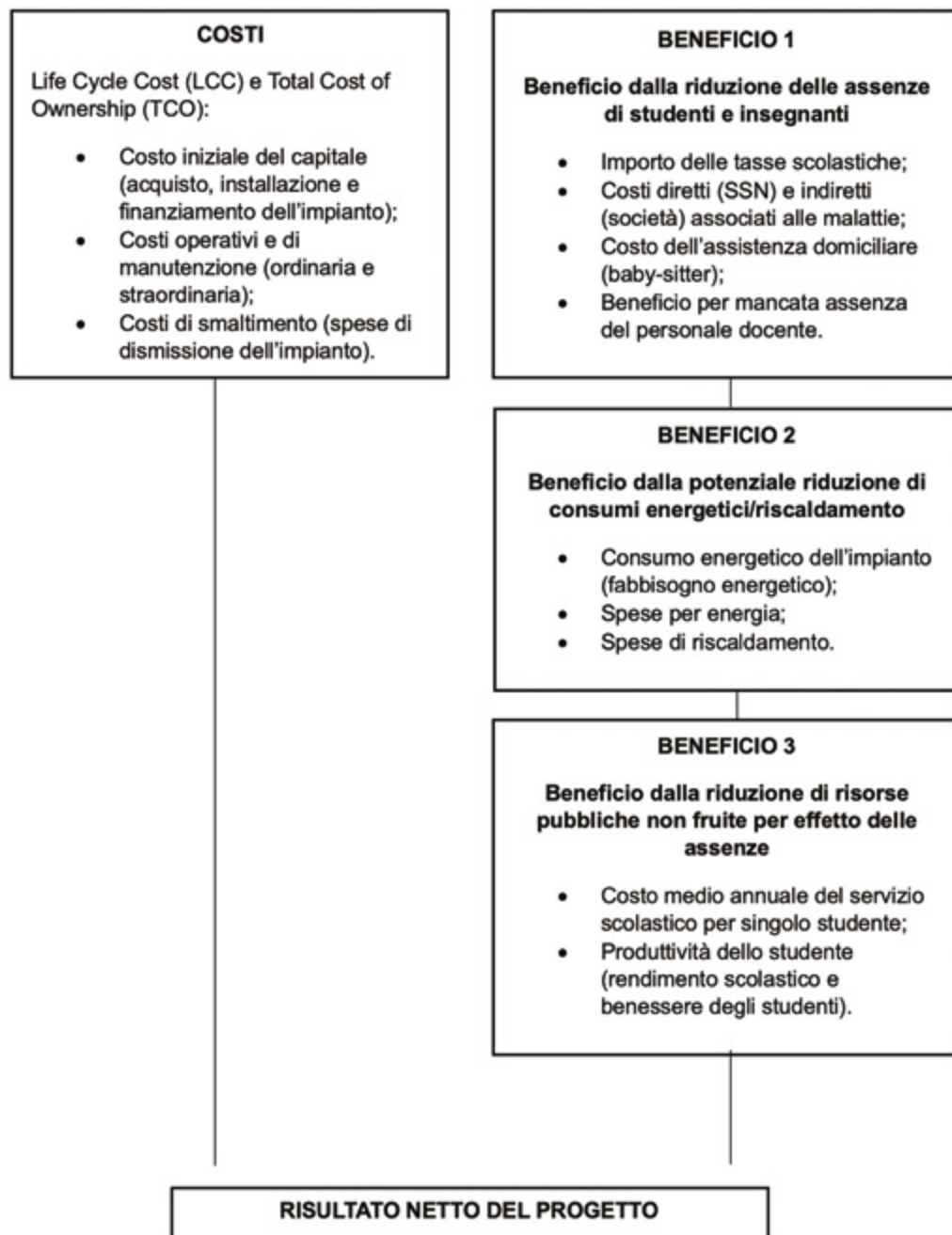
Si precisa che per gli impianti di VMC, un'analisi di LCC completa dovrebbe quindi considerare ogni fase del ciclo di vita del sistema. Questo comprende la valutazione anche dell'impatto ambientale delle materie prime utilizzate nella fase di realizzazione dell'impianto, della fase di installazione, utilizzo e smaltimento. Sebbene rilevanti, non disponendo di informazioni al riguardo, tali elementi non sono stati considerati.

L'analisi ha stimato una vita utile dell'impianto di 15 anni e quindi i costi e benefici individuati sono stati collocati in tale arco temporale e poi attualizzati al tempo t_0 onde renderli comparabili ed aggregabili.

Dal confronto (differenza algebrica) tra il totale dei benefici e il totale dei costi attesi lungo il ciclo di vita dell'impianto si è stimato il risultato netto del progetto.



Cost-Benefit Analysis



Allegato 1: Relazione per caratterizzazione della scuola/classe

Al fine di progettare correttamente l'inserimento di una macchina di ventilazione in una o più classi di una scuola è necessario caratterizzare gli ambienti attraverso una dettagliata relazione contenente diverse informazioni riassunte nella "Scheda scuola" di seguito.

SCHEDA SCUOLA

Nome scuola, indirizzo	
N° piani (fuori terra/ interr)	
Riferimenti responsabile	
Numeri utili	

Data	
Persone presenti	
Formulario compilato da	

UTILIZZO, SPAZI E STRUTTURA

Orari di utilizzo	
N° classi	
N° studenti	
Mensa	sì no
Palestra	sì no
Laboratori	sì no
Altri locali	
Locali particolari	
Manutenzione	
Pulizia degli ambienti	
Wireless disponibile	

CARATTERIZZAZIONE DELL'EDIFICIO

Anno di costruzione	
Anno ristrutturazione	
Ambiente attorno all'edificio	Rurale urbano centro città traffico leggero traffico pesante Area industriale
Esposizione	Nord sud ovest est
Classe energetica	
Pareti	Coibentazione: sì no
Infissi	Pvc legno alluminio Data installazione: vetro: singolo doppio triplo

IMPIANTI

Combustibile	Metano	GPL	gasolio	biomassa
Rinnovabili	Fotovoltaico	solare termico		
Riscaldamento				
Raffrescamento				
Generazione caldo	Caldaia	PDC	teleriscaldamento	Nuovo datato
Generazione freddo	PDC	chiller	Nuovo datato	
Generazione ACS	Boiler resistenza	Caldaia	PDC	teleriscaldamento
Emissione	Radiatori	radiante	ventilconvettori	sistema canalizzato
Regolazione				
VMC	Centralizzata	singolo ambiente		
Ascensore	sì no			
Periodi utilizzo impianti	Riscaldamento Raffrescamento VMC			

SCHEDA SCUOLA

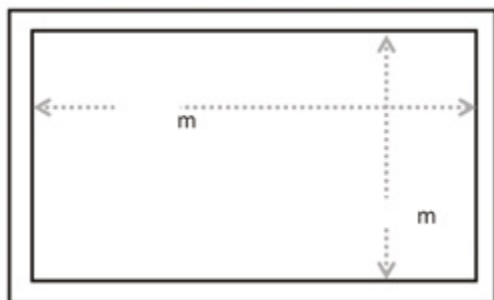
Denominazione aula	
Tipologia aula	
Piano	
N° studenti	

FINITURE

Pareti aule	Intonacate	rivestite di ...		
Pavimento	In legno	ceramica/gres	PVC ...	
Controsoffitto				

CARATTERIZZAZIONE DELLE CLASSI

Altezza classe	
Finestre (descrivere)	
Arredi	
Dotazioni	



Riferimenti, definizioni e bibliografia

	Applicazione, parere tecnico di necessaria
UNI EN 16798-1:2019 + Appendice nazionale 2025	Applicazione: progettazione e analisi energetiche La norma europea UNI EN 16798-1 è il principale riferimento per il calcolo delle portate di ventilazione e per i criteri progettuali dei sistemi di ventilazione.
UNI CEN/TR 16798-2:2020	Report Tecnico della norma UNI EN 16798-1, fornisce esempi di calcolo e dettagli applicativi.
UNI EN 16798-3:2025	Applicazione: progettazione della ventilazione e analisi energetiche per gli edifici non residenziali.
UNI CEN/TR 16798-4:2018	Dettagli tecnici e applicativi della parte 3.
UNI/TS 11300	Norma tecnica italiana da utilizzare solo per analisi energetiche.
CAM Edilizia - 2025	Affidamento di servizi di progettazione e affidamento di lavori per interventi edilizi. Per la ventilazione sono prescritti obblighi per gli edifici di nuova costruzione, le ristrutturazioni di I e II livello e le riqualificazioni energetiche.
Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975	Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica. Il Decreto riporta tassi di ventilazione in funzione del grado scolastico.

	Definizioni
Aerazione	Ventilazione naturale ottenuta aprendo le finestre.
Ricambio dell'aria	Rinnovo dell'aria presente in un ambiente chiuso mediante l'immissione di aria esterna e l'espulsione di quella interna. Il ricambio d'aria può avvenire: <ul style="list-style-type: none"> • Mediante apertura di finestre, infiltrazioni; • meccanicamente (impianti di ventilazione). Nei contesti tecnici si esprime in volumi/ora (quante volte in un'ora viene sostituito l'intero volume d'aria di un locale).
VMC	Ventilazione Meccanica Controllata. Sistema che, per mezzo di un ventilatore, assicura l'immissione di aria fresca, ovvero di aria presa dall'esterno e adeguatamente filtrata, al fine di garantire il benessere e le condizioni igieniche dell'ambiente.
Unità di ventilazione bidirezionale (UVB)	Un apparecchio ad alimentazione elettrica dotato di almeno una girante, un motore e una cassa, destinato ad effettuare il ricambio dell'aria interna con aria proveniente dall'esterno in un edificio o in una sua parte.
Unità non canalizzata	Unità di ventilazione meccanica bidirezionale senza canali di aerazione con recupero di calore; destinata all'uso di uno o più locali.
Recupero di calore	Energia termica recuperata tra due masse di fluidi aventi temperature diverse.
Ventilazione	Processo di movimento dell'aria all'interno di uno spazio chiuso o confinato, al fine di rimuovere l'aria stagnante e sostituirla con aria fresca dall'esterno.

Riferimenti normativi e legislativi

Norme UNI / EN / ISO – Qualità dell'aria interna e ventilazione

- **UNI EN 16798-1:2019** – Prestazione energetica degli edifici. Ventilazione degli edifici. Parte 1: Parametri del clima interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.
- **UNI EN 16798-3:2025** – Prestazione energetica degli edifici. Ventilazione degli edifici. Parte 3: Per gli edifici non residenziali. Requisiti prestazionali per i sistemi di ventilazione e condizionamento dell'aria.
- **UNI CEN/TR 16798-2:2020** – Prestazione energetica degli edifici. Ventilazione degli edifici. Parte 2: Interpretazione dei requisiti della EN 16798-1 (Rapporto tecnico con esempi di calcolo e dettagli applicativi).
- **UNI CEN/TR 16798-4:2018** – Prestazione energetica degli edifici. Ventilazione degli edifici. Parte 4: Dettagli tecnici e applicativi della Parte 3.
- **UNI/TS 11300** – Prestazioni energetiche degli edifici (serie di specifiche tecniche italiane per analisi energetiche).
- **ISO 16000-2** – Indoor air. Parte 2: Sampling strategy for formaldehyde.
- **ISO 16000-3** – Indoor air. Parte 3: Determination of formaldehyde and other carbonyl compounds in indoor air and test chamber air — Active sampling method.
- **ISO 16000-8** – Indoor air. Parte 8: Determination of local mean ages of air in buildings for characterizing ventilation conditions.
- **EN ISO 16000-26** – Indoor air. Parte 26: Sampling strategy for carbon dioxide (CO₂).
- **EN ISO 16890-1** – Filtri per l'aria. Parte 1: Specifiche tecniche, requisiti e sistema di classificazione dell'efficienza basato sul particolato fine (ePM).
- **EN ISO 16911-2** – Ventilation for buildings. Manual and automatic flow rate measurement systems in ductwork. Parte 2: On-site measurement systems.

Norme UNI / EN / ISO – Acustica

- **UNI 11532-2** – Acustica in edilizia. Caratteristiche acustiche interne degli ambienti scolastici. Parte 2: Metodo per la progettazione acustica degli ambienti scolastici.
- **UNI EN ISO 3382-2** – Acustica. Misurazione dei parametri acustici degli ambienti. Parte 2: Tempo di riverberazione in ambienti comuni.
- **UNI EN ISO 16032** – Acustica. Misurazione del livello di pressione sonora degli impianti negli edifici. Metodo di progettazione.
- **UNI 8199** – Acustica. Collaudo acustico degli impianti di climatizzazione e ventilazione. Linee guida contrattuali e modalità di misurazione.
- **UNI 10551** – Acustica. Valutazione della qualità degli ambienti acustici interni. Definizione di criteri soggettivi.
- **UNI EN 17037** – Illuminazione naturale degli edifici (include il parametro del fattore di luce diurna DF).

- **ISO 9921** – Ergonomics. Assessment of speech communication.
- **ISO 12913** – Acoustics. Soundscape (serie; definisce metodologia per la valutazione soggettiva IEQ).
- **IEC 60268-16** – Sound system equipment. Parte 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
- **ECMA 418-2** – Psychoacoustic metrics for ITT equipment. Parte 2: Models based on human perception (Sottek Hearing Model).

Norme tecniche tedesche (VDI)

- **VDI 4300, Parte 7** – Measurement of indoor air pollution. Measurement strategy for determination of indoor air exchange rates (età media locale dell'aria).
- **VDI 3862, Parte 6** – Olfactometry. Field inspection.
- **VDI 3867, Parte 1** – Measurement of particles in ambient air (particolato).

Normativa italiana – Legislazione e decreti

- **D.M. 18 dicembre 1975** – Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica (spazi minimi, requisiti dimensionali delle aule).
- **D.M. 26 agosto 1992** – Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica (limite massimo di 26 persone per aula, requisiti porte).
- **D.P.R. 20 marzo 2009, n. 81** – Norme per la riorganizzazione della rete scolastica e il razionale ed efficace utilizzo delle risorse umane della scuola (parametri per la formazione delle classi).
- **D.M. 24 luglio 1998, n. 331** – Definisce i parametri per la formazione delle classi negli istituti di istruzione secondaria (citato in integrazione al D.P.R. 81/2009).
- **D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81** – Testo Unico in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.
- **D.Lgs. 19 agosto 2005, n. 192 (e s.m.i.)** – Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.
- **D.Lgs. 18 aprile 2016, n. 50** – Codice dei contratti pubblici (appalti pubblici).
- **D.M. 26 giugno 2015** – Requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici.
- **D.M. 23 giugno 2022** – Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici.
- **D.M. 25 novembre 2025** – Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici (aggiornamento 2025).

Articoli scientifici e pubblicazioni

Ale, B. J. M., Hartford, D. N. D., & Slater, D. (2015). ALARP and CBA all in the same game. *Safety science*, 76, 90-100.

Aranzanu, S., & Castagneri, S. (2004). Analisi costi benefici e analisi multicriteri: una proposta di metodo. *Valutare i programmi complessi*, 201.

Barrett, P., Davies, F., Zhang, Y., & Barrett, L. (2015). The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. *Building and environment*, 89, 118-133.

Buonanno, G., Ricolfi, L., Morawska, L., & Stabile, L. (2022). Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools: A retrospective cohort study in Italy's Marche region. *Frontiers in Public Health*, 10, 1087087.

Bussing, R., Halfon, N., Benjamin, B., & Wells, K. B. (1995). Prevalence of behavior problems in US children with asthma. *Archives of pediatrics & adolescent medicine*, 149(5), 565-572.

Chiesa, G., & Vigliotti, M. (2024). Comparing mechanical ventilation control strategies for indoor air quality: Monitoring and simulation results of a school building in northern Italy. *Energy and Buildings*, 322, 114665.

Colombo, G. L., Ferro, A., Vinci, M., Zordan, M., & Serra, G. (2006). Cost-benefit analysis of influenza vaccination in a public healthcare unit. *Therapeutics and clinical risk management*, 2(2), 219-226.

Di Loreto S.; Falone M.; Pierantozzi M.; Montelpare S. 2025. Field Measurements of Indoor Environmental Quality in School Buildings Post-COVID-19: Systematic Review. *Appl. Sci.* 2025, 15, 5692. <https://doi.org/10.3390/app15105692>

Di Loreto S.; Peretti C.; Verdi L., Pierantozzi M., Marcon A., Montelpare S. 2025. Development of an informative protocol for environmental assessment in schools: a comparative case study between north and south Italy. *REHVA HVAC World Congress*, 400-410

Di Pietro, M. L., Poscia, A., Specchia, M. L., de Waure, C., Zace, D., Gasparini, R., ... & Capri, S. (2017). Valutazione di Health Technology Assessment (HTA) del vaccino antinfluenzale adiuvato nella popolazione anziana italiana. *QIJP*, 6(8).

Guglielmi, Leonardo, et al. "Natural vs. Mechanical Ventilation in Schools: A Numerical-Experimental Study for Energy-Efficient Design." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 3143. No. 1. IOP Publishing, 2025.

Diette, G. B., Markson, L., Skinner, E. A., Nguyen, T. T., Algatt-Bergstrom, P., & Wu, A. W. (2000). Nocturnal asthma in children affects school attendance, school performance, and parents' work attendance. *Archives of pediatrics & adolescent medicine*, 154(9), 923-928.

Ehlken, B., Anastassopoulou, A., Hain, J., Schröder, C., & Wahle, K. (2015). Cost for physician-diagnosed influenza and influenza-like illnesses on primary care level in Germany—results of a database analysis from May 2010 to April 2012. *BMC Public Health*, 15, 1-11.

Ellram, L. M. (1993). A framework for total cost of ownership. *The International Journal of Logistics Management*, 4(2), 49-60.

Esposito, S., Cantarutti, L., Molteni, C. G., Daleno, C., Scala, A., Tagliabue, C., ... & Principi, N. (2011). Clinical manifestations and socio-economic impact of influenza among healthy children in the community. *Journal of Infection*, 62(5), 379-387.

Faustman, E. M., Silbernagel, S. M., Fenske, R. A., Burbacher, T. M., & Ponce, R. A. (2000). Mechanisms underlying Children's susceptibility to environmental toxicants. *Environmental health*

perspectives, 108(suppl 1), 13-21.

Ferrin, B. G., & Plank, R. E. (2002). Total cost of ownership models: An exploratory study. *Journal of Supply chain management*, 38(2), 18-29.

Fowler, M. G., Davenport, M. G., & Garg, R. (1992). School functioning of US children with asthma. *Pediatrics*, 90(6), 939-944.

Haverinen-Shaughnessy, U., Shaughnessy, R. J., Cole, E. C., Toyinbo, O., & Moschandreas, D. J. (2015). An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance. *Building and Environment*, 93, 35-40.

Jones, A. P. (1999). Indoor air quality and health. *Atmospheric environment*, 33(28), 4535-4564

Landrigan, P. J., Carlson, J. E., Bearer, C. F., Cranmer, J. S., Bullard, R. D., Etzel, R. A., ... & Suk, W. A. (1998). Children's health and the environment: a new agenda for prevention research. *Environmental Health Perspectives*, 106(suppl 3), 787-794.

Mendell, M. J., & Heath, G. A. (2005). Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor air*, 15(1), 27-52.

Milton, D. K., Glencross, P. M., & Walters, M. D. (2000). Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification, and occupant complaints.

Mishan, E. J., & Quah, E. (2020). *Cost-benefit analysis*. Routledge.

Nag, P. K., & Nag, P. K. (2019). Sick building syndrome and other building-related illnesses. *Office Buildings: Health, Safety and Environment*, 53-103.

Parcel, G. S., Gilman, S. C., Nader, P. R., & Bunce, H. (1979). A comparison of absentee rates of elementary schoolchildren with asthma and nonasthmatic schoolmates. *Pediatrics*, 64(6), 878-881.

Peretti C., Verdi L., Fulici G., Moscato U., Di Perna C. 2024. Dall'esperienza locale a quella nazionale: il progetto necessARIA e la condivisione delle competenze. *Atti di Ecomondo 2024*, Rimini. Maggioli S.p.A. Codice: 978.88.916.7401.2

Rahmqvist, M., Gjessing, K., & Faresjö, T. (2016). Influenza-related healthcare visits, hospital admissions, and direct medical costs for all children aged 2 to 17 years in a defined Swedish region, monitored for 7 years. *Medicine*, 95(33), e4599.

Di Loreto, S.; Serpilli, F.; Lori, V.; Di Perna, C. Comparison between Predictive and Measurement Methods of Speech Intelligibility for Educational Rooms of Different Sizes with and without HVAC Systems. *Energies* 2023, 16, 2719. <https://doi.org/10.3390/en16062719>

F Serpilli, S. Di Loreto, V Lori, C Di Perna. The impact of mechanical ventilation systems on acoustic quality in school environments. *E3S Web of Conferences* 343, 05002.

Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R. (1997). Sick-building syndrome. *The Lancet*, 349(9057), 1013-1016.

Rossi M.F.; Beccia F.; Leone R.; Peretti C.; Verdi L.; Di Perna C.; Montelpare S.; Caggiano G.; Moscato U.; Working Group, Necessaria. 2025. Impact assessment of Controlled Mechanical Ventilation systems for air quality in school buildings: a study protocol. *Issue Vol. 20 No. 1 (2025). EPIDEMIOLOGY BIOSTATISTICS AND PUBLIC HEALTH*. DOI: <https://dx.doi.org/10.54103/2282-0930/28136>

Scholz, S., Damm, O., Schneider, U., Ultsch, B., Wichmann, O., & Greiner, W. (2019). Epidemiology and cost of seasonal influenza in Germany—a claims data analysis. *BMC Public Health*, 19, 1-10.

Seppänen, O. A., & Fisk, W. (2006). Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health. *Hvac&R Research*, 12(4), 957-973.

Shan, X., Melina, A. N., & Yang, E. H. (2018). Impact of indoor environmental quality on students' wellbeing and performance in educational building through life cycle costing perspective. *Journal of Cleaner Production*, 204, 298-309.

Silva, M. L., Perrier, L., Späth, H. M., Grog, I., Mosnier, A., Havet, N., & Cohen, J. M. (2014). Economic burden of seasonal influenza B in France during winter 2010-2011. *BMC public health*, 14, 1-10.

Spee-Van Der Wekke, J., Meulmeester, J. F., Radder, J. J., & Verloove-Vanhorick, S. P. (1998). School absence and treatment in school children with respiratory symptoms in The Netherlands: data from the Child Health Monitoring System. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 52(6), 359-363

Steen, B. (2005). Environmental costs and benefits in life cycle costing. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 16(2), 107-118

Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor air*, 14

Ugolini, C. (2019), *Qualità dell'Aria negli Edifici Scolastici*. WP3. Indagine sullo stato dell'arte e del mercato Task 3.1 - Indagine sullo stato dell'arte: criteri e parametri che influenzano la qualità dell'aria negli edifici scolastici.

Wargocki, P., Wyon, D. P., Baik, Y. K., Clausen, G., & Fanger, P. O. (1999). Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads. *Indoor air*, 9(3), 165-179.

Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing—Theory, information acquisition and application. *International journal of project management*, 15(6), 335-344.

Yamaya, M., Ohroi, T., Kubo, H., Ebihara, S., Arai, H., & Sasaki, H. (2002). Prevention of respiratory infections in the elderly. *Geriatrics & gerontology international*, 2(3), 115-12





Ministero della Salute

Progetto finanziato dal Ministero della salute
nell'ambito del Piano Nazionale Complementare
"Salute, Ambiente, Biodiversità, Clima"
Codice progetto PREV-A-2022-12377013



Autonome Provinz Bozen
Provincia autonoma di Bolzano
Provincia autonoma de Südtirol
SÜDTIROL - ALTO ADIGE

**REGIONE
MARCHE**



**ASSESSORATO
INFRASTRUTTURE**



**REGIONE
ABRUZZO**



**UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore**



**UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE**



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI BARI
ALDO MORO**





www.necessaria.it
info@necessaria.it

ISBN 979-12-243-2935-0



9 791224 329350