



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Analisi sperimentale della qualità dell'aria interna nelle aule scolastiche

Experimental indoor air quality investigation in school classrooms

Relatore: Chiar.mo

Prof. **Costanzo Di Perna**

Tesi di Laurea di:

Emma Di Bartolomeo

Correlatore:

Ing. **Remia Giada**

A.A. 2023/ 2024

Abstract

Il lavoro di ricerca svolto indaga sulla qualità dell'aria negli edifici scolastici esistenti e sui risultati ottenibili introducendo un sistema di ventilazione ibrido. L'indagine è stata svolta su due aule di una scuola elementare di Recanati dove è stato installato un sistema di ventilazione meccanica delocalizzato e implementato un sistema di monitoraggio dei principali inquinanti e delle condizioni climatiche. L'indagine si è svolta nei mesi di aprile e maggio 2024 nei quali si verificano le condizioni ideali per la ventilazione naturale.

Vengono descritti metodi e procedure utilizzate per l'acquisizione, la validazione e l'elaborazione di grandi quantità di dati ottenibili dai sistemi di monitoraggio.

Viene effettuato lo studio nel dominio del tempo, mediante rappresentazione sul medesimo grafico, di un set di grandezze adeguatamente scelte. Si valuta l'influenza dei parametri sull'efficacia della ventilazione mediante l'osservazione della concentrazione di un inquinante indice, la CO₂.

Viene utilizzato lo studio della densità di probabilità della occorrenza dei valori di concentrazione di inquinanti indice (CO₂), e della relativa curva di densità cumulativa, per valutare il raggiungimento degli obiettivi di qualità dell'aria. Il calcolo della "probabilità condizionata", calcolata sulla occorrenza della variabile CO₂ rispetto al verificarsi di condizioni su un parametro misurato, ha consentito di studiare l'influenza di alcune variabili misurate, sull'efficacia della ventilazione. Questi metodi hanno consentito di valutare in maniera sintetica grandi quantità di dati.

Lo studio ha evidenziato che la ventilazione naturale ha permesso di raggiungere i requisiti di qualità solo se adeguatamente progettata.

Indice

Indice	3
Introduzione	5
La qualità dell'aria nelle aule scolastiche	7
Principali inquinanti	7
Anidride carbonica	8
Composti Organici Volatili (VOC Volatile Organic Compound)	11
Formaldeide	12
Radon	13
Particolato	13
La ventilazione	15
Caratteristiche della ventilazione naturale	16
Caratteristiche della ventilazione meccanica	16
Filtrazione dell'aria esterna	18
Ventilazione ibrida	19
Metodi di immissione ed estrazione dell'aria in ambiente: efficienza della ventilazione	20
Ventilazione a miscelazione	21
Ventilazione a pistone	22
La situazione normativa per la qualità dell'aria negli edifici scolastici	23
Decreto ministeriale 18 dicembre 1975	23
Norma UNI 10339:1995	24
UNI EN 16798-1:2019-1	24
Caso di studio	28
Progetto "Necessaria"	28
Le aule oggetto di studio	29
Aula 10	31
Aula 11	32
Distribuzione dell'aria	33
Sistema di monitoraggio	33
Posizionamento delle apparecchiature e condizioni di misura	34
Sistema di monitoraggio aula 10	35
Sistema di monitoraggio aula 11	39
Tipologia e posizionamento apparecchiature aula 11	40
Misura e registrazione dei dati	41
Esempio di codice in Python per la elaborazione dei dati	43
Studio delle grandezze misurate per la valutazione della ventilazione nel dominio del tempo	47

Aula 10	47
Valutazioni relative alle misure della giornata di mercoledì 8 maggio	48
Valutazioni relative alle misure della giornata di giovedì 9 maggio	50
Valutazioni relative alle misure della giornata di venerdì 10 maggio	51
Valutazioni relative alle misure della giornata di lunedì 13 maggio	52
Valutazioni relative alle misure della giornata di martedì 14 maggio	53
Valutazioni relative alle misure della giornata di mercoledì 15 maggio	53
Osservazioni conclusive sullo studio del comportamento edificio-impianto nel dominio del tempo	54
Andamenti della temperatura esterna ed interna	54
Differenza tra i valori di CO ₂ acquisiti dalla hobo 3, hobo 8 e hobo 9 all'interno dell'aula 10	55
Confronto tra i valori di CO ₂ (hobo 3), voc e potenza del recuperatore	56
Andamento dell'energia assorbita dal recuperatore	57
Aula 11	57
Valutazioni relative alle misure della giornata di mercoledì 8 maggio	58
Valutazioni relative alle misure della giornata di giovedì 9 maggio	59
Valutazioni relative alle misure della giornata di venerdì 10 maggio	60
Valutazioni relative alle misure della giornata di lunedì 13 maggio	61
Valutazioni relative alle misure della giornata di martedì 14 maggio	62
Valutazioni relative alle misure della giornata di mercoledì 15 maggio	63
Energia assorbita dal recuperatore per l'aula 11	63
Confronto tra i valori di CO ₂ nell'aula 10 e 11	64
Analisi dei dati con metodi basati sulla frequenza di occorrenza dei campioni	65
Analisi delle curve di densità di occorrenza delle concentrazioni di CO ₂	67
Effetti dell'ampliamento del periodo di osservazione	69
Metodo per valutare l'influenza di un determinato fattore sull'efficacia della ventilazione ..	70
Conclusioni	73
Bibliografia	75
Appendice	76
Specifiche tecniche degli strumenti di misura e registrazione dei dati	76

Introduzione

La qualità dell'aria è un aspetto fondamentale della Indoor Environmental Quality (IEQ), ovvero delle condizioni ambientali all'interno degli edifici che possono influenzare il benessere, la salute e la produttività delle persone che vi risiedono o lavorano.

All'IEQ contribuiscono diversi fattori: qualità dell'aria, l'illuminazione, l'acustica, il comfort termico, la qualità dell'acqua all'interno di un edificio. Negli edifici scolastici l'aspetto della qualità dell'aria assume particolare rilevanza in quanto impatta direttamente sull'apprendimento e sulla salute degli alunni, insegnanti e personale scolastico con conseguenze che possono anche riguardare la velocità di diffusione di malattie trasmissibili per via aerea. Un'aria pulita, priva di inquinanti e con un adeguato controllo della carica microbica, contribuisce a mantenere la salute degli studenti e a potenziare la loro capacità di apprendimento.

Malgrado esistano normative italiane dal 1975 che regolamentano il ricambio d'aria in ambienti scolastici, molte scuole non si sono ancora adeguate a queste disposizioni. Nella maggior parte degli edifici scolastici italiani la ventilazione è affidata alla aerazione e solo una piccola percentuale è dotata di sistemi di ventilazione meccanica, ad esempio dai dati dell'Anagrafe Scolastica Nazionale messa a disposizione dal "Ministero dell'Istruzione e del Merito" (MIM), risulta che nella Regione Marche solo il 9% degli edifici scolastici è dotato di ventilazione meccanica. Questi dati mettono in evidenza che la situazione delle scuole italiane rispetto alla qualità dell'aria è un problema che interessa la quasi totalità degli edifici. L'assenza di un sistema di ventilazione meccanica è un indicatore della possibilità di ottenere qualità dell'aria accettabile nella stagione invernale, quando ventilazione naturale e benessere termico degli occupanti confliggono.

Nelle nuove costruzioni è relativamente semplice integrare impianti di ventilazione mentre risulta complicato quando si interviene su edifici esistenti. In questi casi, la presenza di vincoli architettonici, quali ad esempio le altezze dei locali, rende spesso difficoltosa l'installazione di sistemi di ventilazione adeguati impedendo il raggiungimento dei livelli di qualità dell'aria desiderati. Questo rappresenta una sfida significativa nei progetti di ristrutturazione e miglioramento degli edifici scolastici esistenti.

Pertanto, mentre le nuove costruzioni offrono al progettista un certo grado di libertà e flessibilità, le riqualificazioni degli edifici esistenti pongono spesso sfide più complesse, richiedendo soluzioni progettuali non sempre immediate.

In questa tesi, di tipo sperimentale, si studierà il caso di una scuola elementare di Recanati (AN) nella quale è stato adottato un sistema di ventilazione ibrido mediante l'installazione di un sistema di ventilazione meccanica delocalizzato. È stato predisposto un sistema di monitoraggio delle principali grandezze correlate al comfort ambientale e degli inquinanti. Questo studio è parte di un progetto nazionale chiamato "Necessaria" che ha l'obiettivo di promuovere, sviluppare, condividere competenze e strategie sul tema della qualità dell'aria negli edifici scolastici.

L'obiettivo della tesi consiste nello:

- Studio di metodi e strumenti per la raccolta, validazione, elaborazione dei dati;
- Sviluppo di metodi di analisi dei dati raccolti;
- Valutazione dei risultati in relazione agli obiettivi di IAQ fissati in un caso reale.

Lo studio ha interessato i mesi di aprile e maggio del 2024, mesi interessati da un clima mite e ha consentito di sviluppare metodi e procedure utili al proseguimento dell'esperimento nella restante parte dell'anno scolastico ed in particolare nella stagione invernale.

La qualità dell'aria nelle aule scolastiche

La qualità dell'aria dipende dalla presenza di inquinanti che ne alterano la sua composizione naturale. La qualità dell'aria negli ambienti con presenza umana si definisce accettabile quando in essa non sono presenti inquinanti noti in concentrazioni dannose e quando la maggioranza delle persone non esprime insoddisfazione. La presenza di inquinanti può incidere su aspetti che riguardano la salute, la produttività o aspetti soggettivi quali la percezione degli occupanti legati alla percezione olfattiva. La qualità dell'aria negli ambienti confinati si riflette sia sulla salute a breve e lungo termine degli occupanti, in particolare se di età scolare, che sulla produttività scolastica [1]

Il controllo della concentrazione di inquinanti in un ambiente dipendono può essere perseguito:

- Riduzione di inquinanti presenti nell'aria esterna (ad esempio per filtrazione del particolato);
- Mediante riduzione del carico interno di inquinanti;
- Eliminazione degli inquinanti mediante ventilazione.

Gli inquinanti prodotti dalle sorgenti interne possono essere ridotti:

- limitando la presenza di sorgenti inquinanti all'interno degli ambienti. È importante la scelta dei materiali da costruzione, di quelli costituenti gli arredi, i prodotti in uso per le attività svolte e per la pulizia;
- rimuovendo gli inquinanti alla fonte mediante cappe di aspirazione ed espulsione ad esempio come si fa nelle cucine per evitare che i fumi e gli altri effluenti si riversino in ambiente.

Principali inquinanti

La fonte degli inquinanti può essere esterna o interna agli ambienti. La posizione dell'edificio scolastico in relazione ad aree urbane ad alto traffico o zone industriali determina una maggiore concentrazione nell'aria di inquinanti quali ad esempio PM10, PM01, NO2. L'inquinamento dell'area nella quale sorge l'edificio costituisce un limite importante alla possibilità di ottenere qualità elevata dell'aria interna. Questo non costituisce oggetto di questo lavoro

Le sorgenti di inquinanti interni nelle aule possono essere suddivise in due categorie:

- sostanze derivanti dal metabolismo degli occupanti come anidride carbonica (CO₂) e altri composti organici derivanti dalla respirazione il cui carico è correlato al numero e alla attività svolta dagli occupanti

- Inquinanti derivati da materiali presenti nelle aule come ad esempio materiali edili, arredi, prodotti per la pulizia, ecc.

I principali inquinanti che si considerano sono:

- Anidride carbonica
- Composti organici volatili – VOC
- Formaldeide
- Radon
- Polveri PM_x
- Ossidi di azoto No_x
- Inquinanti biologici (virus, batteri, muffe)

In questo lavoro monitoreremo CO₂ e VOC, il primo per l'importanza che riveste quale indicatore della efficacia della ventilazione e il secondo in quanto principale inquinante presente negli ambienti scolastici e correlato ai materiali con cui sono costruiti, agli arredi e altri materiali presenti al loro interno

Anidride carbonica

L'anidride carbonica (CO₂) è un gas incolore inodore con peso molecolare 44 g/mol, di densità superiore a quella dell'aria e pertanto tende a stratificarsi al suolo. La concentrazione dell'anidride carbonica nell'aria esterna, pur essendo influenzata dalla presenza dalle emissioni del traffico veicolare, dagli impianti di riscaldamento presenti in ambito urbano o dalle emissioni industriali, varia molto poco rispetto al suo valore minimo dell'atmosfera che attualmente è di 420 ppm [2].

Nelle aule scolastiche viene prodotto quasi esclusivamente dal metabolismo degli occupanti che lo espellono attraverso la respirazione. La quantità di anidride carbonica emessa dall'uomo varia con l'età e con l'attività svolta.

Nella tabella che segue sono raccolti i ratei di emissione di individui in età scolastica in base all'età, al sesso e all'indice metabolico (MET Metabolic Equivalent of Task) [3].

CO ₂ generation rates at 273 K and 101 kPa for ranges of ages and level of physical activity (based on mean body mass in each age group)									
Age (y)	Mean body mass (kg)	BMR (MJ/day)	CO ₂ generation rate (L/s)						
			Level of physical activity (met)						
			1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	3.0	4.0
Males									
<1	8.0	1.86	0.0009	0.0011	0.0013	0.0014	0.0018	0.0027	0.0036
1 to <3	12.8	3.05	0.0015	0.0018	0.0021	0.0024	0.0030	0.0044	0.0059
3 to <6	18.8	3.90	0.0019	0.0023	0.0026	0.0030	0.0038	0.0057	0.0075
6 to < 11	31.9	5.14	0.0025	0.0030	0.0035	0.0040	0.0050	0.0075	0.0100
11 to <16	57.6	7.02	0.0034	0.0041	0.0048	0.0054	0.0068	0.0102	0.0136
16 to <21	77.3	7.77	0.0037	0.0045	0.0053	0.0060	0.0075	0.0113	0.0150
Females									
<1	7.7	1.75	0.0008	0.0010	0.0012	0.0014	0.0017	0.0025	0.0034
1 to <3	12.3	2.88	0.0014	0.0017	0.0020	0.0022	0.0028	0.0042	0.0056
3 to <6	18.3	3.59	0.0017	0.0021	0.0024	0.0028	0.0035	0.0052	0.0070
6 to < 11	31.7	4.73	0.0023	0.0027	0.0032	0.0037	0.0046	0.0069	0.0092
11 to < 16	55.9	6.03	0.0029	0.0035	0.0041	0.0047	0.0058	0.0088	0.0117
16 to <21	65.9	6.12	0.0029	0.0036	0.0042	0.0047	0.0059	0.0089	0.0119
21 to < 30	71.9	6.49	0.0031	0.0038	0.0044	0.0050	0.0063	0.0094	0.0126

Per un ambiente salubre e buone condizioni di apprendimento, il livello di CO₂ nelle aule scolastiche non dovrebbe mai superare i 1200 ppm, corrispondente ai limiti della categoria II della UNI EN 16798-1 [4].

Per comprendere l'importanza e la necessità di controllare la presenza di anidride carbonica basti considerare che in un'aula delle dimensioni di quella oggetto di studio in cui inizialmente la concentrazione è quella dell'aria incontaminata, ovvero 420 ppm, dopo un'ora dell'ingresso di 24 alunni dell'età di 11 anni, la concentrazione di CO₂ raggiunge i 2492 ppm.

Al risultato si arriva considerando che dalla tabella sopra riportata, e trasformando il dato da l/s a g/h a 25°C e 1 bar, un allievo emette circa 21 g/h di CO₂. Quindi l'emissione totale dei 24 alunni in un ora è di 504g. pertanto l'aumento della concentrazione di CO₂ dovuto alle emissioni degli occupanti nell'aula (Vol. aula =135 m³):

$$C = 504/135 = 3.73 \text{ g/m}^3 = 3730 \text{ mg/m}^3$$

Per calcolare la concentrazione totale va considerata la concentrazione iniziale dell'aula pari a 420 ppm ovvero 756 mg/m³. Pertanto la concentrazione totale vale $C_{\text{tot}} = 3730 + 756 = 4486 \text{ mg/m}^3$. Che espresso in ppm vale:

$$C(\text{ppm}) = (24.45 \times 4486) / 44 = 2492 \text{ ppm}$$

Dove 44 rappresenta il peso molecolare della CO₂.

Il livello di concentrazione di anidride carbonica (CO₂) rappresenta un indicatore efficace della qualità dell'aria. Questo perché l'aumento di CO₂ è proporzionale all'aumento di altre sostanze presenti nell'aria, come inquinanti e agenti microbici. La CO₂ non è misurata per la sua pericolosità intrinseca, ma perché fornisce un metodo pratico per valutare il livello di contaminazione dell'aria negli ambienti interni, come le aule scolastiche, e permette di determinare l'efficacia del ricambio d'aria necessario per mantenere condizioni salubri.

Composti Organici Volatili (VOC Volatile Organic Compound)

La norma UNI/PdR 122:2022 “Monitoraggio della qualità dell’aria negli edifici scolastici - Strumenti, strategie di campionamento e interpretazione delle misure” [5] fornisce la seguente definizione di VOC:

La classe dei composti organici volatili, COV o VOC, comprende svariati composti con comportamenti fisici e chimici differenti, ma sono accomunati dal fatto che presentano un'elevata volatilità. Tali composti sono caratterizzati dalla presenza di carbonio legato organicamente. Sono inquinanti gassosi che possono provenire dall'esterno o da fonti interne: idrocarburi alifatici, aromatici e clorurati, aldeidi (es. formaldeide), terpeni, alcoli, eteri e chetoni, BTEX (benzene, toluene, etilbenzene e xilene).

La sommatoria dei singoli composti organici volatili si definisce TVOC ovvero composti organici volatili totali; trattasi di numerosi gruppi di composti, difficoltosi da determinare singolarmente, alle volte si preferisce quindi determinarli come sommatoria di tutti i composti.

Un elenco dettagliato delle fonti dei singoli VOC è riportato nell'Appendice informativa B della norma UNI EN ISO 16000-32.

Le fonti interne di un ambiente indoor sono:

- i materiali costituenti l'involucro edilizio e gli arredi;*
- le presone presenti ad esempio per l'uso di deodoranti e per il vestiario;*
- le attività svolte come ad esempio le operazioni di pulizia con uso di prodotti contenenti VOC.*

Le fonti esterne sono:

- traffico motorizzato;*
- emissioni di flussi convogliati civili e industriali.*

Le concentrazioni di composti organici volatili (COV) all'interno degli edifici possono superiori rispetto a quelle all'esterno. Questo fenomeno è particolarmente evidente negli edifici di nuova costruzione, che, per motivi di efficienza energetica, tendono a essere più sigillati. Di conseguenza, i livelli di COV all'interno degli spazi chiusi sono aumentati rispetto al passato.

L'esposizione ai COV può avere diversi effetti negativi sulla salute. A breve termine, può causare disturbi come mal di testa, irritazioni a occhi, gola e naso, mentre a lungo

termine l'esposizione prolungata può portare a patologie più gravi, come malattie cardiovascolari, disturbi respiratori e danni a organi interni come fegato, milza e reni. Nella norma UNI EN 16798-1 sono riportati i limiti sulle emissioni dei materiali; non vi è limite specifico per la concentrazione di TVOC nell'aria. Vi sono valori guida fissati dall'OMS e da organismi non italiani (come ad esempio Umweltbundesamt tedesco). Uno studio[6] suggerisce una classificazione per valutare i livelli di COV negli ambienti interni:

- $x < 250$ ppb: i livelli di COV sono considerati sicuri;
- $250 \text{ ppb} < x < 2000$ ppb: intervallo di attenzione;
- $x > 2500$ ppb: livello di rischio, le esposizioni sono pericolose per la salute.

Ppb (part per billion).

Formaldeide

La formaldeide è un composto organico volatile (VOC) con formula chimica HCHO tra i più diffusi e noti, gas incolore con un odore acre e irritante. Secondo lo IARC è un prodotto cancerogeno di classe A1, è questo il principale motivo di ricerca e dell'esistenza di un limite di legge. Usata nell'industria chimica, nella fabbricazione di oggetti di design d'interni e nei prodotti per la pulizia. Molti prodotti della costruzione contengono formaldeide, in particolare viene utilizzato per la produzione di resine, utilizzate a loro volta per la produzione di truciolato e materiali a base di legno, colle, prodotti isolanti, ecc. La formaldeide viene rilasciata anche a distanza di molti anni dai collanti in cui è presente.

Nelle scuole, la formaldeide può essere rilasciata da diversi materiali utilizzati nella costruzione e nell'arredamento, come mobili, pavimentazioni, rivestimenti per pareti, soffitti sospesi, isolanti termici, adesivi e sigillanti. Inoltre, può essere presente anche in alcuni prodotti per la pulizia, come i detergenti per pavimenti e bagni. L'esposizione alla formaldeide può provocare vari problemi di salute, tra cui irritazione agli occhi, alle vie respiratorie e alla pelle. L'esposizione si prolungata, può ridurre la funzionalità polmonare e aumentare il rischio di sviluppare infezioni croniche delle vie respiratorie e aumentare il rischio di sviluppare neoplasie.

Limiti normativi o legislativi:

- Circolare del Ministero della Sanità n. 57 del 22 giugno 1983: limite concentrazione formaldeide: 0,1 ppm = 123 µg/m³.
- Organizzazione Mondiale della Sanità: limite concentrazione formaldeide: 100 µg/m³ ovvero 0,08 ppm

Radon

Gas nobile di origine naturale radioattivo, privo di colore, odore e sapore e radioattivo, prodotto di decadimento dell'uranio. Presente nella crosta terrestre, il Radon penetra negli edifici attraverso crepe, fessure o punti aperti delle fondamenta.

La fonte principale del Radon nelle abitazioni sono le rocce sottostanti l'edificio e il terreno fino alla superficie, dai quali il gas radon viene propagato. Fonte secondaria possono essere i materiali da costruzione

Essendo un gas pesante, tende ad accumularsi nei piani inferiori, come seminterrati e cantine. Il radon è stato classificato come cancerogeno dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC).

Per ridurre i livelli di radon negli edifici, le soluzioni più comuni includono la sigillatura delle aperture attraverso le quali il gas potrebbe entrare o il miglioramento del sistema di ventilazione per favorire un maggiore ricambio d'aria con l'esterno.

D.Lgs 101/2020: livello massimo di riferimento espresso in termini di valore medio annuo della concentrazione di attività di radon in aria: 300 Bq/m³ (gli edifici scolastici sono inclusi tra i luoghi di lavoro). Tale valore è un livello di riferimento, ovvero si consiglia di intervenire per ridurre le concentrazioni anche quando il limite non viene raggiunto.

Particolato

Per "polveri" si intendono tutte le particelle solide che rimangono sospese in aria per un tempo sufficiente da essere soggette a fenomeni di diffusione e trasporto e interessare le vie respiratorie. La sigla PM "Particulate Matter" viene tradotta con "materiale particellare sospeso", il numero accanto indica la grandezza del diametro della particella che può variare fino a 10 micron o micrometri (1 micron = 1 milionesimo del metro). Il PM10 è chiamato anche frazione toracica in quanto, passando per il naso,

è in grado di raggiungere la gola e la trachea (localizzate nel primo tratto dell'apparato respiratorio). Le particelle più piccole (con diametro inferiore a 2,5 micron) chiamate PM_{2,5} o frazione respirabile, possono invece arrivare ancora più in profondità nei polmoni.

Le fonti di particolato sono:

Indoor: combustione (camini e stufe per il riscaldamento e per la preparazione di cibi), desquamazione della pelle, rilascio da parte di materiali da costruzione ed elementi di arredo, sollevamento di polveri legata a diverse attività, cattivo stato di manutenzione dei sistemi di condizionamento.

Outdoor: gas di scarico prodotti da mezzi di trasporto con motori a benzina e diesel (auto, bus, camion, motorini, ecc.), sollevamento di polveri dalle superfici stradali, combustioni derivate dagli impianti di riscaldamento e dai camini per uso di biomasse e gasolio.

Il valore guida WHO per l'esposizione della popolazione a PM_{2,5} su base annuale è pari a 5 µg/m³, mentre quello giornaliero è 15 µg/m³. Per l'esposizione della popolazione a PM₁₀, il valore guida annuale della WHO è di 15 µg/m³ mentre su base giornaliera è 45 µg/m³. Secondo la guida WHO 2021, i valori guida definiti per il PM₁₀ e per il PM_{2,5} in aria ambiente sono applicabili anche agli ambienti indoor.

Uno studio condotto in una scuola ha evidenziato che i livelli di PM₁₀ all'interno delle aule sono superiori rispetto all'esterno, nonostante queste particelle siano generate principalmente all'esterno, ad esempio nei processi di combustione. Questo fenomeno è legato alla risospensione delle particelle più grandi causata dalle attività umane all'interno degli ambienti chiusi. Lo studio ha inoltre mostrato una correlazione tra l'andamento temporale dei livelli di CO₂ e PM₁₀ all'interno delle classi, suggerendo che entrambi i parametri tendono a seguire un andamento simile.[7]

La ventilazione

La ventilazione è il processo mediante il quale l'aria viene scambiata tra l'interno di un ambiente e l'ambiente esterno al fine di rimuovere l'aria inquinata dell'ambiente interno e sostituirla con aria esterna. L'efficacia della ventilazione presuppone che l'aria esterna abbia concentrazioni di inquinanti inferiori a quelli dell'ambiente interno e abbia livelli di inquinanti inferiori a quelli considerati non accettabili.

Essa costituisce il metodo privilegiato e insostituibile per assicurare qualità dell'aria agli ambienti confinati.

La ventilazione può essere ottenuta con metodi diversi:

- **ventilazione naturale:** metodo di ventilazione dove l'aria, movimentata da forze naturali associate a gradienti di pressione e di temperatura, entra e esce dagli ambienti attraverso le aperture presenti, nell'involucro edilizio. Gli infissi possono essere azionati manualmente oppure tramite azionamenti automatici;
- **ventilazione meccanica:** sistema di ventilazione dove l'aria è immessa o estratta dall'edificio, mediante ventilatori e un sistema di distribuzione dell'aria costituito da canali, diffusori e griglie di ripresa. La ventilazione meccanica si dice controllata (VMC) quando avviene una regolazione della portata o altri parametri dell'aria immessa in relazione ad una variabile di controllo misurata in ambiente (ad esempio la concentrazione di anidride carbonica);
- **ventilazione ibrida:** sistema di ventilazione in cui la ventilazione meccanica e la ventilazione naturale vengono entrambe utilizzate in maniera integrata per garantire le condizioni di benessere e controllo della qualità dell'aria.

La norma UNI EN 16798-3:2018 [8] stabilisce che in ambienti ad elevato affollamento, in cui gli occupanti costituiscono la sorgente di inquinamento principale, l'anidride carbonica può essere considerata un indice della qualità della ventilazione.

Caratteristiche della ventilazione naturale

La ventilazione naturale è il metodo più diffuso negli edifici scolastici italiani.

La movimentazione dell'aria è affidata alle differenze di pressione dell'aria dovuti alle condizioni esterne, in particolare la presenza di venti, e ai gradienti di temperatura tra l'interno e l'esterno dell'edificio. Essa è condizionata dalle dimensioni delle aperture, dalla loro posizione. Il problema principale della ventilazione naturale è la formazione di correnti fredde nei mesi invernali che ha come conseguenza l'abitudine degli abitanti limitare l'apertura con conseguente riduzione della qualità dell'aria. Il problema della formazione di correnti si riscontra anche nelle stagioni più miti in quanto una eccessiva velocità dell'aria nella zona occupata può dare luogo a situazioni di discomfort o ostacolare lo svolgimento delle attività didattiche. Un altro problema è l'aleatorietà del verificarsi di condizioni interne ed esterne che favoriscono il movimento dell'aria. Possono verificarsi ad esempio condizioni non favorevoli alla movimentazione dell'aria con conseguente scarsa ventilazione, o il verificarsi di condizioni esterne che impediscono l'apertura degli infissi a causa di forti piogge o venti. Pertanto la ventilazione naturale richiede frequenti regolazioni delle aperture per adeguarsi alle mutevoli condizioni esterne.

Negli edifici scolastici ove sono necessarie portate d'aria importanti oltre al problema delle correnti fredde la ventilazione naturale, fornisce risultati molto scadenti di efficienza energetica. Il problema del controllo della temperatura di immissione dell'aria immessa si presenta anche nella stagione calda ove l'introduzione dei grandi portate di aria esterna è incompatibile con il mantenimento di buone condizioni climatiche interne. Fortunatamente il problema è di scarso rilievo nelle aule scolastiche che restano inutilizzate nei periodi più caldi dell'anno.

Per attenuare i problemi delle correnti fredde e assicurare una sufficiente ventilazione la ventilazione naturale richiede una progettazione molto attenta che può trarre vantaggio della possibilità di automatizzare le aperture.

Caratteristiche della ventilazione meccanica

La ventilazione meccanica consiste nella movimentazione dell'aria mediante uso di ventilatori. Si svincola in tal modo la portata di ventilazione dalla aleatorietà delle condizioni climatiche interne ed esterne dell'ambiente da ventilare e consente di

controllare le portate di aria immessa in maniera precisa ed eventualmente controllata, ad esempio in risposta alla concentrazione di un inquinante indicatore.

La ventilazione meccanica può essere realizzata come semplice immissione di aria esterna, estrazione o a doppio flusso, immissione ed estrazione

La presenza di un sistema di ventilazione meccanica a doppio flusso apre alla possibilità di inserire nuove importanti funzioni la cui importanza è tale da rappresentare un criterio di decisivo alla sua adozione:

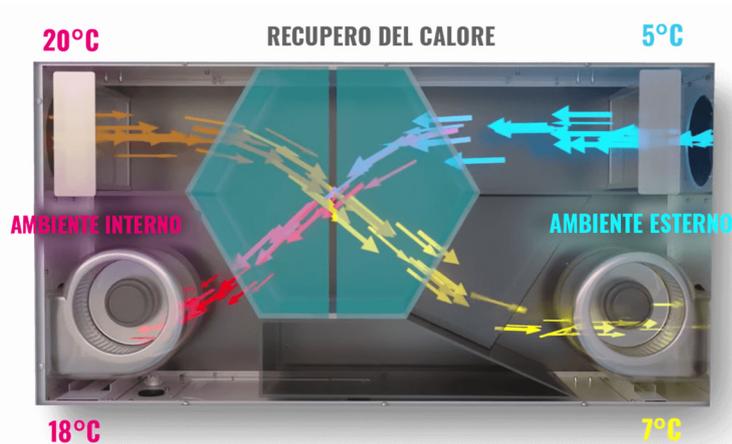
- Recupero del calore dell'aria espulsa in favore dell'aria immessa
- Possibilità di eseguire trattamenti termodinamici sull'aria immessa in modo da immettere in ambiente aria alle condizioni ideali per la sua distribuzione in ambiente ed il controllo dell'umidità relativa
- Possibilità di adottare sistemi di diffusione dell'aria in ambiente che ottimizzano l'efficienza di ventilazione e diminuiscano gli effetti negativi della eccessiva velocità e della bassa temperatura dell'aria immessa nella zona occupata.

Esistono due principali approcci alla definizione della struttura di un impianto di ventilazione meccanica:

- impianti con sistemi di ventilazione centralizzata in cui una unità di trattamento aria distribuisce l'aria a tutti gli ambienti dell'edificio mediante un sistema di canali;
- impianti con sistemi di ventilazione delocalizzati nei quali le unità di ventilazione sono poste al servizio di singoli ambienti

I primi consentono di fare trattamenti termodinamici dell'aria immessa quali deumidificazione, umidificazione, raffreddamento, riscaldamento e recupero del calore.

Nei sistemi delocalizzati, in cui gli ingombri delle macchine rivestono importanza determinate per il posizionamento, difficilmente si riescono a realizzare tutti i trattamenti elencati. Normalmente è presente solo un recuperatore di tipo passivo, costituito generalmente da uno scambiatore di calore tra l'aria da espellere e quella immessa. La presenza di questo recuperatore di calore è determinante nella valutazione economica e funzionale della ventilazione meccanica, infatti nei mesi invernali oltre all'impatto decisivo sulla efficienza energetica esso determina un riscaldamento dell'aria di mandata che rende l'immissione in ambiente meno problematica.



Schema di una unità di ventilazione meccanica a doppio flusso con recuperatore passivo (dal sito web Caleffi)

L'installazione degli impianti centralizzati risulta spesso problematica negli edifici scolastici esistenti soprattutto a causa della necessità di installare canalizzazioni per l'aria di mandata e di ripresa di dimensioni importanti in edifici che erano stati costruiti senza prevedere questa necessità.

Gli aspetti negativi da tenere sotto controllo nella progettazione degli impianti di ventilazione meccanica riguardano soprattutto il rumore generato dal movimento dell'aria nei condotti e dai diffusori e dai ventilatori e la possibilità che l'impianto diventi ricettacolo di polveri e microrganismi che possono essere veicolati nell'ambiente. Grande attenzione va posta nella progettazione e nella manutenzione per attenuare questo rischio

Filtrazione dell'aria esterna

Quando si usa la ventilazione meccanica la filtrazione dell'aria esterna da immettere in ambiente è sempre necessaria anche quando la captazione avviene da una posizione che ne garantisce la purezza, in quanto serve a garantire che tutto il sistema di ventilazione non raccolga, negli anni, le particelle in sospensione che depositandosi nei canali e nelle unità di ventilazione possono favorire lo sviluppo di batteri o muffe che possono poi essere diffuse nell'ambiente (sindrome dell'edificio malato). Se l'edificio scolastico è ubicato, come spesso accade in ambiente urbano, è necessario valutare la possibilità di usare filtri che abbattano anche il particolato fine.

La norma UNI EN ISO 16890 suddivide in quattro categorie l'efficienza dei filtri in base al livello di protezione raggiunto rispetto alle dimensioni del particolato (PM):

- Coarse (grossolano),
- ISO ePM10,
- ISO ePM2,5
- ISO ePM1.

La presenza dei filtri impone che siano rispettati cicli di sostituzione che non possono essere ignorati pena l'inefficienza di filtrazione, l'accumulo e la diffusione di contaminanti, la riduzione di efficienza e della portata di ventilazione. Negli ambienti scolastici sono da preferire sistemi di segnalazione automatica della necessità di sostituzione dei filtri in base, ad esempio, alla misura della perdita di carico del filtro che è correlata con la sua saturazione.

Ventilazione ibrida

Lo svantaggio della ventilazione naturale è che essa dipende dalle condizioni di vento e di esposizione delle aperture e che l'utente è portato a condizionare l'apertura dei serramenti alle condizioni di temperatura dell'aria esterna limitando la quantità della ventilazione in ampi periodi dell'anno (ad esempio in inverno, per evitare correnti fredde gli occupanti tendono a tenere chiusi gli infissi accettando come compromesso una qualità dell'aria inferiore). Il vantaggio della ventilazione naturale è legato soprattutto alla mancanza di assorbimenti elettrici necessari alla movimentazione dell'aria e ad una efficacia molto alta del free cooling quando si verificano le condizioni climatiche favorevoli

D'altra parte la ventilazione meccanica risolve questi problemi in quanto la portata dell'aria di rinnovo non è influenzata dalle condizioni esterne e può essere immessa in ambiente in condizioni di temperatura e velocità controllate o almeno temperate dalla presenza dei recuperatori di calore e pertanto assicura una qualità dell'aria superiore, soprattutto nelle stagioni in cui gli utenti tendono a limitare l'apertura degli infissi (ad esempio in inverno)

La ventilazione meccanica presenta lo svantaggio di avere consumi energetici non trascurabili, costi di installazione e manutenzione, gestione dei aspetti psicologici legati alla abitudine consolidata degli utenti di poter controllare la ventilazione secondo i propri bisogni percepiti, sia in relazione alla qualità dell'aria che alla temperatura.

Un approccio vantaggioso, soprattutto nelle regioni a clima temperato, è la ventilazione ibrida.

I sistemi di ventilazione ibrida sono sistemi bimodali di ventilazione che sfruttano i vantaggi della movimentazione naturale e meccanica dell'aria, in funzione delle condizioni climatiche esterne giornaliere o stagionali.

In sostanza gli utenti possono utilizzare la ventilazione naturale o quella meccanica basandosi sulle condizioni climatiche esterne di temperatura e ventilazione al fine di raggiungere le migliori condizioni di comfort. Tale scelta può essere fatta manualmente da utenti educati allo scopo oppure da un sistema automatico che valuta l'opportunità di impiego dei sistemi in base alle condizioni climatiche esterne ed interne ed agisce segnalando all'utente come operare manualmente per attivare la VMC o la ventilazione naturale oppure agendo con azionamenti automatici sulla apertura delle finestre o l'attivazione della VMC.

Il primo modo si dimostra all'atto pratico poco efficace in quanto gli occupanti tendano ad intervenire sull'apertura/chiusura dei serramenti solo con temperature esterne molto alte e influenzati piuttosto dalla percezione di comfort termico.

Con la ventilazione ottenere una ventilazione efficace in tutti i momenti dell'anno e del giorno, limitando gli inconvenienti di entrambi i sistemi di ventilazione. Infatti si eliminano i problemi di correnti fredde e si limitano i carichi termici invernali dovuti al ricambio dell'aria, ad esempio nelle giornate fredde invernali utilizzando la ventilazione meccanica e si evitano le perdite energetiche necessarie alla movimentazione dell'aria della ventilazione meccanica quando le condizioni climatiche esterne sono favorevoli alla ventilazione naturale.

Uno studio condotto da *Steiger et al. [10]*, mette in evidenza che la ventilazione ibrida a controllo automatico, in un clima europeo, conduce ad un consumo energetico inferiore del 44-52% rispetto ai valori tipici dell'areazione naturale o meccanica. In un clima temperato come quello presente in gran parte delle regioni italiane porterebbe vantaggi di efficienza energetica anche superiori.

Metodi di immissione ed estrazione dell'aria in ambiente: efficienza della ventilazione

L'aria può essere diffusa e ripresa in ambiente in vari modi. A parità di portata la rimozione degli inquinanti presenti in ambiente dipende da come essi sono distribuiti spazialmente in base alla loro natura e posizione delle sorgenti e al metodo di immissione ed estrazione dell'aria in ambiente.

Si definisce efficienza di ventilazione il rapporto tra la concentrazione media di inquinanti all'interno della zona occupata e la concentrazione di inquinanti nell'aria di estrazione, ovvero l'aria che viene rimossa dall'ambiente. Più il sistema di ventilazione è efficiente, più ridotta sarà la concentrazione di inquinanti all'interno della stanza rispetto a quella dell'aria estratta.

$$\mathcal{E} = (C_R - C_M) / (C_{OCC} - C_M)$$

Dove:

- C_R è la concentrazione di inquinanti nell'aria estratta dal sistema di ventilazione;
- C_M è la concentrazione di inquinanti nell'aria di mandata.
- C_{OCC} è la concentrazione media di inquinanti nella zona occupata

I metodi più comuni o adatti alla ventilazione delle aule scolastiche sono la ventilazione a miscelazione e quella a pistone

Ventilazione a miscelazione

Nella ventilazione a miscelazione l'aria di mandata viene immessa dall'alto con diffusori ad alta induzione, distribuiti su tutto il soffitto in modo da provocare, nella zona occupata, dei moti turbolenti che favoriscono la miscelazione dell'aria esterna con quella contaminata. l'obiettivo è ottenere la diluizione degli inquinanti all'interno dell'intero spazio. L'estrazione avviene in genere dall'alto.

L'efficienza di ventilazione della ventilazione a miscelazione perfetta è unitaria.

E' una sistema di ventilazione molto diffuso.

Se la temperatura di immissione è più alta di quella della zona occupata l'aria immessa tende a stratificarsi e a non raggiungere la zona occupata. Nella distribuzione dell'aria primaria (distribuzione dell'aria con soli fini di ventilazione e non di climatizzazione) questa condizione puo' verificarsi in estate se l'unità di trattamento dell'aria non è dotata di una batteria di raffreddamento prima della immissione in ambiente. E' il caso tipico delle VMC delocalizzate senza raffreddamento, in regime estivo che ritroviamo nel nostro caso di studio.

In questo caso non si può più parlare di miscelazione e l'efficienza di ventilazione di riduce a valori minimi in quanto l'aria immessa stratifica e viene ripresa dall'alto prima che esegua il lavaggio della zona occupata.

Ventilazione a pistone

La ventilazione a pistone, nota anche come ventilazione a dislocamento, è un sistema di ventilazione che funziona creando un flusso d'aria unidirezionale e stratificato all'interno di un ambiente. L'aria di rinnovo viene immessa a temperature leggermente inferiore a quella della zona occupata e a bassa velocità con diffusori posti in basso, e spinge verso l'alto l'aria viziata, che viene estratta nella parte alta del locale.

Il principio di funzionamento si basa sulla differenza di temperatura tra l'aria immessa e quella interna: l'aria fresca immessa è più fredda, tende a rimanere nella parte inferiore dell'ambiente, mentre l'aria calda, che tende a salire, porta con sé gli inquinanti verso l'alto, dove viene rimossa.

La ventilazione a pistone è molto efficiente nel rimuovere gli inquinanti, poiché non c'è miscelazione tra l'aria nuova e quella contaminata e il flusso d'aria ascendente asporta gli inquinanti, soprattutto la CO₂ di produzione umana che nel punto di emissione è più calda dell'ambiente e quindi riesce ad essere trascinata dal flusso d'aria ascendente, nonostante il peso molecolare della CO₂.

la stratificazione dell'aria permette di mantenere una temperatura più stabile nella zona occupata, riducendo il rischio di correnti d'aria.

La ventilazione a pistone è più efficace in ambienti con soffitti alti, dove lo spazio per il ricambio d'aria verticale è maggiore.

Questo tipo di ventilazione è particolarmente adatto a luoghi con affollamenti elevati dove è necessaria una buona qualità dell'aria, come aule scolastiche.

La situazione normativa per la qualità dell'aria negli edifici scolastici

Le principali leggi e norme applicabili all'edilizia scolastica in relazione alla qualità dell'aria sono riportate nel seguito. Sono state calcolate le portate di ventilazione ottenute dalla applicazione delle diverse norme considerate.

Decreto ministeriale 18 dicembre 1975

Il Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975 "Norme tecniche aggiornata relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di edilizia scolastica."

Il decreto, che si occupa di aspetti urbanistici, architettonici e funzionali degli edifici scolastici, interviene anche sulla qualità dell'aria interna, afferma che gli edifici scolastici devono essere costruiti lontano da sorgenti inquinanti. Il decreto richiede la "purezza chimica e microbiologica dell'aria", stabilendo un numero di ricambi d'aria all'ora, il cui valore varia a seconda della destinazione d'uso degli ambienti scolastici, facendo poi anche riferimento alla posizione della presa d'aria esterna e alla tenuta dell'aria degli infissi. Il decreto è ancora in vigore per la sola parte relativa alla qualità dell'aria paragrafi 5.3.11 e 5.3.12.

Si riporta nel seguito parte del par. 5.3.12 della Norma:

"Purezza dell'aria

Dovrà essere assicurata l'introduzione delle seguenti portate di aria esterna, mediante opportuni sistemi:

- i) Ambienti adibiti ad attività didattica collettiva o attività di gruppo.
Per scuole materne ed elementari coefficienti di ricambio 2,5
Per scuole medie coefficiente di ricambio 3,5
Per scuole secondarie di 2° grado coefficiente di ricambio 5"*

Con coefficienti di ricambio il decreto intende il ricambio di volumi d'aria all'ora;
Si ricava per l'aula in esame, che ha un volume di 135 m³, una portata di immissione
 $Q=135 \times 2,5=337 \text{ m}^3/\text{h}$

Norma UNI 10339:1995

La norma UNI 10339:1995 è una norma tecnica di tipo prescrittivo che fornisce indicazioni in merito alle portate di aria esterna o di estrazione per gli impianti aeraulici da adottare in relazione alla destinazione d'uso degli ambienti [11].

Sebbene sia stata ritirata il 04 luglio 2024, non è stata sostituita e rappresenta ancora un riferimento utile ma di applicazione non obbligatoria, valendo, per le norme UNI in vigore, solo la presunzione di regola dell'arte in caso di applicazione.

La norma, di tipo prescrittivo, stabilisce le Portate d'aria esterna per persona in funzione del tipo di attività.

Nella tabella seguente è riportato un estratto del prospetto III "Portate di aria in edifici adibiti ad uso civile"

Tipo di ambiente	Portata di aria esterna per persona [10^{-3} m ³ /s]
Asili nido/scuole materne	4
Aule scuole elementari	5
Aule scuole medie	6
Aule scuole superiori	7
Biblioteche/sale lettura	6
Aule musica e lingue	7
Laboratori	7
Sale insegnanti	6

Per le scuole elementari sono previsti 5 l/s persona pari a 18 m³/h persona.

Considerando la presenza di 24 alunni, la portata d'aria di immissione prescritta dalla norma UNI 10339 è di 432 m³/h.

UNI EN 16798-1:2019-1

La norma UNI EN 16798-1:2019 "Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente 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 - Modulo M1-6"

La norma, di tipo prestazionale, definisce 4 categorie per la qualità dell'aria

Categoria	Livello di aspettativa	commento
IEQ1	Alto	
IEQ2	Medio	Livello normale
IEQ3	Moderato	Livello minimo di progettazione
IEQ4	basso	Non ammesso

Sono definiti 3 metodi per la definizione dei parametri di progettazione:

metodo 1: basato sulla qualità dell'aria percepita

metodo 2: che utilizza i valori limite per la concentrazione della sostanza

metodo 3: basato su portate di ventilazione predefinite

si considera il metodo 2 utilizzando la CO₂ come inquinante di riferimento. La Norma fornisce la seguente tabella per la definizione dei valori limite.

Tabella A.9. Valori di CO₂ da sommare alla concentrazione esterna

Categoria	Concentrazione di CO ₂ da sommare a quella esterna (ppm)	Concentrazione di CO ₂ (ppm)	Dettagli sulle categorie: livello di aspettativa
I	550	< 1000 ppm	Alto
II	800	Tra 1000 e 1250 ppm	Medio
III	1350	Tra 1250 e 1800 ppm	Moderato
IV	1350	> 1800 ppm	Basso

Nel seguito viene assunto come valore limite per la valutazione della qualità dell'aria quello 1200 ppm corrispondente alla categoria II.

La norma **UNI EN 16798-1** indica un metodo per il calcolo del tasso di rinnovo tale da mantenere la concentrazione di equilibrio di un certo inquinante (compresa la CO₂) al

di sotto di un dato livello massimo prefissato: “*Method 2 using criteria for individual substances*”

La portata di aria esterna Q in [m^3/s] richiesta per diluire un dato contaminante è esprimibile come:

$$Q = Gh / Ev (Ch,i - Ch,o) \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Dove:

Gh è il tasso di emissione dell'inquinante in [$\mu g/s$]

Ev è l'efficienza di ventilazione

Ch,i è la concentrazione limite dell'inquinante nell'aria interna in [$\mu g/m^3$].

Ch,o è la concentrazione nell'aria di mandata in [$\mu g/m^3$].

Per passare da valori di concentrazione espressi in ppm a valori in [$\mu g/m^3$] la seguente equazione:

$$Ch,i = (Ch,i' \cdot Mp \cdot 1000) / 24.45 \text{ [}\mu\text{g/m}^3\text{]}$$

dove Mp è la massa molare della CO_2 pari a 44 [g/mole]

pertanto la concentrazione di CO_2 dell'atmosfera esterna, 420 ppm, espressa in [$\mu g/m^3$] vale 755828 a 25°C e 1 Bar.

Si è ipotizzato una efficienza di ventilazione Ev piuttosto bassa e pari a 0,6 perché la distribuzione dell'inquinante all'interno dell'aula dipende molto dal tipo di distribuzione dell'aria e dalla temperatura di immissione. Nel caso della VMC dell'aula in esame, l'aria viene immessa estratta da terminali posti a livello del soffitto a temperature di circa 2-6 K superiori a quelle ambiente e pertanto tendono a stratificare e a raggiungere con più difficoltà la zona occupata.

Assumendo che un bambino in età di scuola primaria emetta circa 21 g/h di anidride carbonica, la produzione di CO_2 di una classe di 24 alunni vale 139500 [$\mu g/s$], si può calcolare la portata d'aria di rinnovo necessaria a contenere entro 1200 ppm la concentrazione di anidride carbonica. Si trova **$Q=397 \text{ [m}^3\text{/h]}$** , valore non troppo distante da quelli proposti dalle norme prescrittive considerate. Va osservato che questo calcolo è molto sensibile alla stima del parametro Ev , che risulta molto difficile da stimare e pertanto va utilizzato con prudenza.

Nella seguente tabella si riportano i valori della portata d'aria di rinnovo prescritti per il caso di studio dalle leggi e norme considerate:

	portata d'aria prescritta
DM 18/12/1975	337 m ³ /h
UNI 10339	432 m ³ /h
UNI EN 16798-1 (metodo 2)	397 m ³ /h

Caso di studio

Progetto “Necessaria”

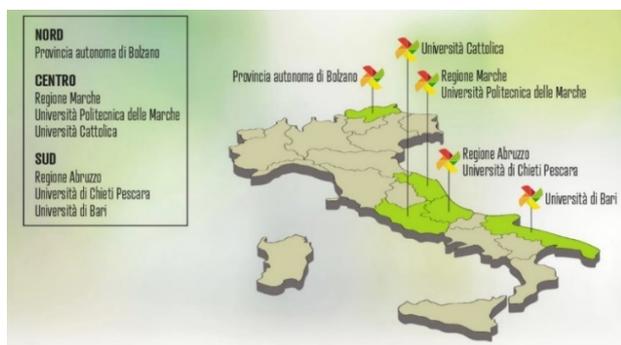


Lo studio condotto sulla scuola di Recanati è parte integrante di un progetto a livello nazionale che prende il nome di “Necessaria”. Quest’ultima è un’iniziativa del Ministero della Salute nell’ambito del

Piano Nazionale Complementare "Salute, ambiente, biodiversità, clima" che ha come principali obiettivi l’esigenza di promuovere, sviluppare e condividere competenze e strategie sul tema della qualità dell’aria negli edifici scolastici, con il fine ultimo di garantire il benessere degli occupanti all’interno degli stessi. Il progetto è stato lanciato a Bolzano nel marzo 2023 ed ha una durata complessiva di quattro anni, da gennaio 2023 a dicembre 2026.

L’idea è quella di analizzare edifici rappresentativi per le diverse condizioni climatiche sul territorio nazionale, infatti a tale scopo il progetto coinvolge realtà territoriali del nord caratterizzate da climi rigidi, quindi edifici scolastici montani (Provincia di Bolzano e Regione Abruzzo), realtà territoriali del centro e del sud, quindi edifici scolastici di pianura ed edifici scolastici sul mare (Regione Marche, Abruzzo e Puglia), ed edifici appartenenti alle realtà metropolitane (Roma, Bari) ed edifici in contesti rurali.

Nello specifico le università coinvolte sono l’Università Politecnica delle Marche, l’Università Cattolica del Sacro Cuore, l’Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" e l’Università degli Studi "Gabriele d’Annunzio", insieme a quattro istituti di ricerca e alla Provincia, che coordina il progetto attraverso l’Agenzia provinciale per l’ambiente e la tutela del clima.



Università coinvolte nel progetto “Necessaria”

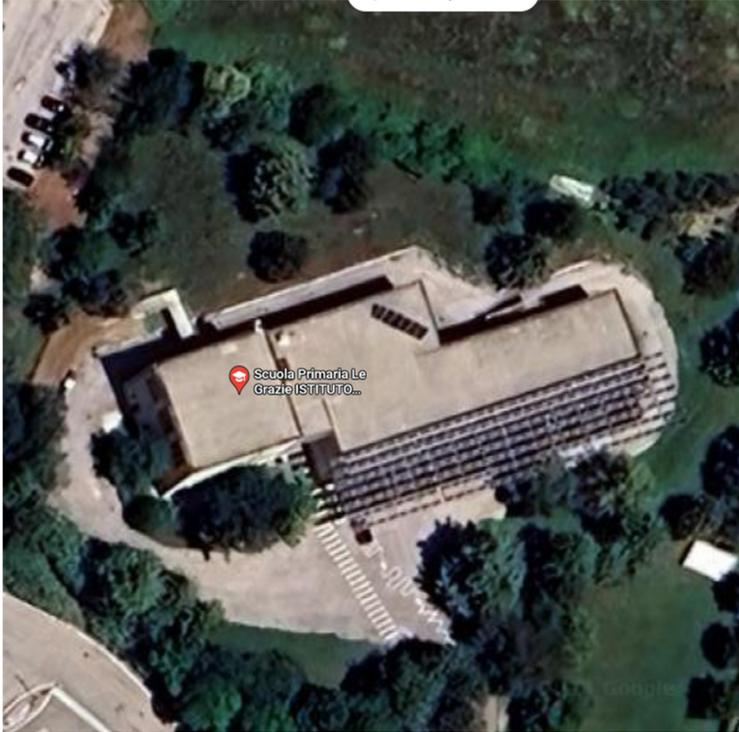
Le aule oggetto di studio

Oggetto di studio sono state due aule di una scuola primaria di Recanati. Le aule si trovano al primo piano e presentano aperture esposte a sud. E' presente un sistema di schermatura solare esterno. La struttura è costituita da telai in cemento armato e tamponature in laterizio. Ogni aula presenta 2 aperture dotate di infisso vetrato con una sezione apribile che copre circa il 30% della sua superficie con meccanismo di apertura sia a battente che vasistas.

La superficie di areazione risulta pertanto modesta, soprattutto quando viene utilizzata la sola apertura a vasistas. Considerato che l'apertura a battente non è sempre utilizzabile a causa della scarsa protezione dalla pioggia e per il fatto che può creare correnti d'aria che possono essere fastidiose anche nella stagione calda, la ventilazione naturale non è ben dimensionata. La condizione della ventilazione nelle scuole esistenti, nonostante sia il metodo di ventilazione con cui sono state progettate, non è sempre ottimale e l'edificio oggetto di studio presenta questa deficienza che verrà messa in luce dalle misure effettuate.



Prospetto sud dell'edificio ove sono visibili le finestre delle aule oggetto di studio al primo piano



Prospettiva sopraelevata della scuola di Recanati

Per entrambe le aule si è scelto di utilizzare una ventilazione ibrida delocalizzata. A tal fine è stato installato in controsoffitto un sistema di ventilazione meccanica a doppio flusso con recupero di calore la cui portata nominale è di $500 \text{ m}^3/\text{h}$, la potenza elettrica alla portata nominale è di 220 W . Non è presente un trattamento di riscaldamento o raffreddamento sul flusso di mandata.

Le due aule presentano stessa geometria, esposizione, aperture e schermature e differiscono per la regolazione della portata del sistema di ventilazione.

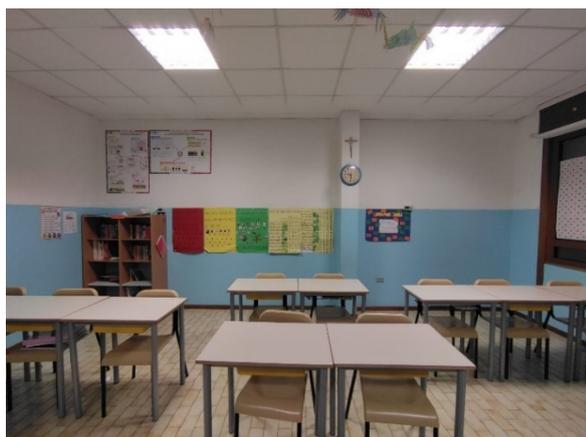
Aula 10

L'aula 10 ospita 24 alunni, ha una superficie di 44,8 m², un'altezza di 3 metri ed un volume di 134,4 m³.



Aula 11

L'aula ospita 24 alunni, ha una superficie di 46,72 m², un'altezza di 3 metri ed un volume di 140,16 m³.



Distribuzione dell'aria

Il sistema di distribuzione dell'aria è costituito da due diffusori d'aria posti in controsoffitto e due griglie di ripresa dell'aria esausta poste anch'esse in controsoffitto. La mandata e la ripresa sono posizionate in maniera contrapposta. E' stata utilizzato il modello "DRU 50 orizzontale" della Roccheggiani la cui portata nominale è di 500 m³/h e assorbimento elettrico nominale di 230 W.

Considerato che lo studio è stato effettuato in un periodo nel quale la temperatura esterna è quasi sempre superiore a quella interna, e pertanto la temperatura di immissione è maggiore della temperatura ambiente nonostante la presenza del recuperatore, sicuramente si ha una riduzione della efficienza di ventilazione in quanto l'aria immessa dall'alto tende a stratificarsi. La presenza della bocchetta di ripresa a soffitto non aiuta a migliorare il lavaggio della stanza in quanto aspira l'aria pulita appena immessa, prima che quest'ultima riesca ad interessare la zona occupata. E' stato scelto questo tipo di distribuzione in quanto, avendo adottato un sistema di ventilazione ibrido, la ventilazione meccanica va ottimizzata per la stagione fredda. Infatti nella stagione invernale l'aria viene immessa a temperatura più fredda di quella dell'ambiente e quindi raggiunge facilmente la zona occupata.

Sistema di monitoraggio

Il monitoraggio è stato effettuato nei mesi di aprile e maggio 2024. Nelle due aule oggetto di studio sono stati installati dei sistemi di monitoraggio per la misura delle seguenti grandezze:

- Anidride carbonica (CO₂)
- Temperatura interna(T)
- Umidità relativa (RH)
- Total Volatile Organic Compounds (TVOC)
- Presenza degli occupanti
- Apertura degli infissi
- Apertura della porta
- Temperatura esterna
- Potenza elettrica assorbita dal recuperatore
- Energia consumata dall'unità di ventilazione
- Pressione atmosferica

Per il monitoraggio delle grandezze di interesse sono stati impiegati i sensori e sistemi di acquisizione riportati nella seguente tabella:

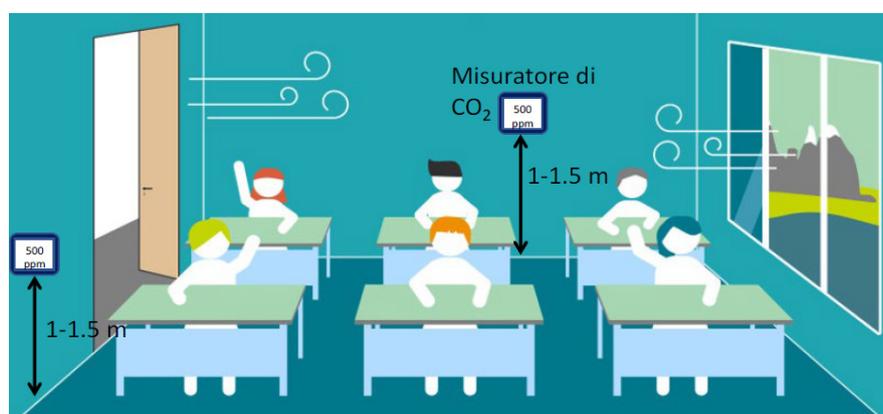
APPARECCHI DI MISURA UTILIZZATI		
Nome Sensore	Grandezze rilevate	Logger
HOBO® MX CO2 Logger (MX1102A) Manual	T int, RH, CO2	HOBO
Shelly Door/Window2	AC, T	Home Assistant
Shelly 1PM	Energia, Potenza VMC	Home Assistant
Aqara TVOC Air Quality Monitor	T,UR,VOC	Home Assistant
Aranet4 031ED	CO2,Pressione,T,RH	Home Assistant
Netatmo Interna	ustica,CO2,Pressione,T,I	Netatmo
Aqara Presenza	Presenza	Home Assistant
Netatmo esterna	T esterna, UR esterna	Netatmo

Le specifiche tecniche sono riportate in appendice

Posizionamento delle apparecchiature e condizioni di misura

Le condizioni e i metodi di misurazione delle grandezze inquinanti, attraverso il posizionamento dei sensori ambientali, sono descritte nella norma UNI/PdR 122:2022 “Monitoraggio della qualità dell’aria negli edifici scolastici - Strumenti, strategie di campionamento e interpretazione delle misure”.

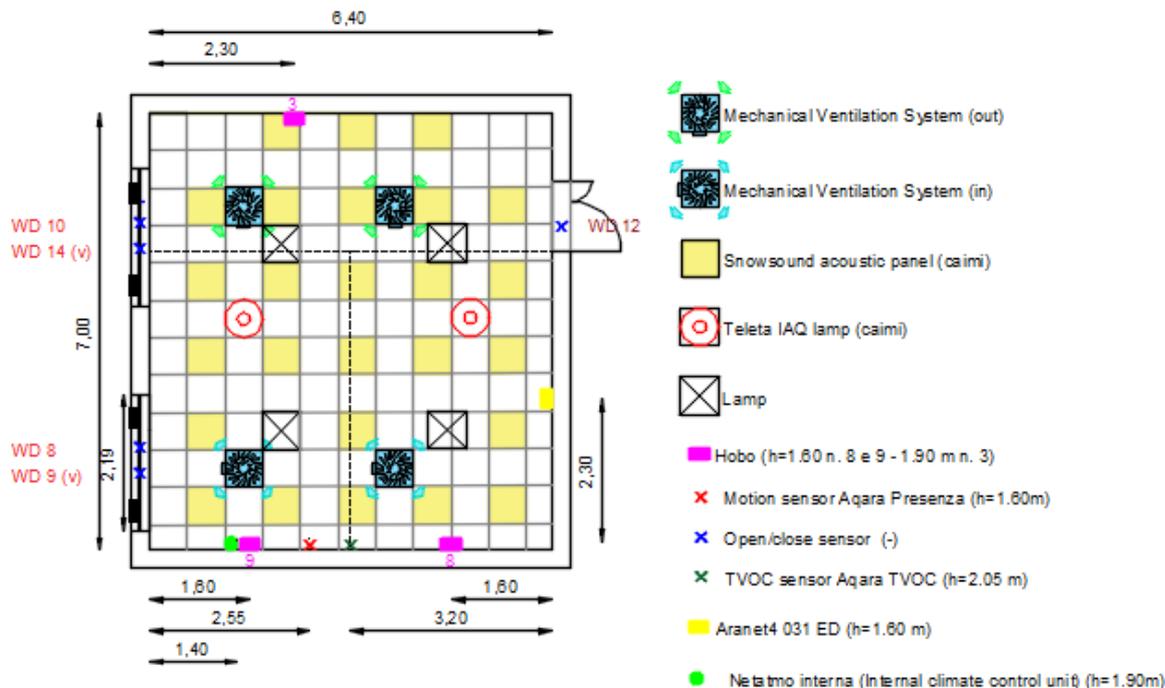
Per l’Anidride carbonica i criteri considerati per la collocazione del sensore sono stati, secondo quanto riportato nella UNI EN ISO 16000-26: installazione tra 1.0 - 1.5 metri da terra, altezza rappresentativa dell’aria che gli occupanti respirano, inoltre gli strumenti di misurazione devono essere riparati da possibili fonti di calore (sistemi di riscaldamento), dalle aperture e dalle correnti d’aria dei sistemi di immissione.



Collocazione ideale del misuratore di CO₂

Per i **TVOC** (Total Volatile Organic Compound) la misura viene effettuata in continuo, ovvero la misura viene effettuata durante le normali condizioni d'uso dell'aula senza una preparazione della prova.

Sistema di monitoraggio aula 10



Agli apparecchi di misura utilizzati sono stati attribuiti dei codici di riferimento (registrazione delle apparecchiature) per l'individuazione dei dati raccolti come indicato nella tabella seguente.

Aula 10 / Stanza 27				Dbeaver
Nome Sensore	Device Id	Identificativo Assegnato	Posizione nell'aula	metadata_id
Shelly 1PM	B0B21C0F57FC	PM1	Recuperatore	447 (overheating), 448 (overpowering), 449 (overvoltage), 451 (reboot), 236 (switch_0_energy), 235 (switch_0_power), 450 (switch_0)
Shelly Door/Window2	6F251C	WD8	Finestra F1 a battente	255 (o/c), 442 (battery), 256 (luminosity), 257 (temperature)
Shelly Door/Window2	6F2515	WD9	Finestra F1 vasistas	259 (o/c), 443 (battery), 260 (luminosity), 261 (temperature)
Shelly Door/Window2	6F2524	WD10	Finestra F2 a battente	266 (o/c), 445 (battery), 267 (luminosity), 268 (temperature)
Shelly Door/Window2	6F251F	WD14	Finestra F2 vasistas	282 (o/c), 285 (battery), 283 (luminosity), 284 (temperature)
Shelly Door/Window2	6F2537	WD12	Porta	274 (o/c), 277 (battery), 275 (luminosity), 276 (temperature)
Shelly H&T	CAA7D8	TH1	All'interno del quadro	444 (battery), 264 (humidity), 263 (temperature)
Nome Sensore	Nome su Home Assistant	Identificativo Assegnato	Posizione nell'aula	metadata_id
Aqara TVOC	lumi.airmonitor.acn01	AqaraTVOC	Vedere planimetria	454 (identify), 99 (battery), 101 (humidity), 100 (temperature), 102 (voc_level)
Aranet4 031ED	Aranet4 031ED	Aranet4 031ED	Vedere planimetria	42 (battery), 41 (carbon_dioxine), 39 (humidity), 40 (pressure), 38 (temperature)
Aqara Presenza	Presence_Sensor_FP2_C77	Aqara Presenza	Vedere planimetria	307 (sensor 1), 190 (sensor 2), 452 (sensor 3), 453 (identify), 306 (light_sensor_light_level)
Netatmo Esterna	Unknown 70:ee:50:2e:b8:36	NE	Scala esterna opposta all'aula	51 (battery_percent), 50 (humidity), 49 (temperature)
Netatmo Interna	Stazione Climatica Netatmo	NI	Vedere planimetria	45 (co2), 48 (humidity), 47 (noise), 46 (pressure), 63 (temperature)

Aula 10 / Stanza 27			
Nome Sensore	Identificativo Assegnato	Grandezze rilevate	Logger
HOBO	3	T int, RH, CO2	HOBO
HOBO	8	T int, RH, CO2	HOBO
HOBO	9	T int, RH, CO2	HOBO
Shelly Door/Window2	WD8	AC, T	Home Assistant
Shelly Door/Window2	WD9	AC, T	Home Assistant
Shelly Door/Window2	WD10	AC, T	Home Assistant
Shelly Door/Window2	WD14	AC, T	Home Assistant
Shelly Door/Window2	WD12	AC, T	Home Assistant
Shelly 1PM	PM2	Energia, Potenza VMC	Home Assistant
Aqara TVOC	AqaraTVOC	T,UR,VOC	Home Assistant
Aranet4 031ED	Aranet4 031ED	CO2,Pressione,T,RH	Home Assistant
Netatmo Interna	NI	Acustica,CO2,Pressione,T,RH	Netatmo
Aqara Presenza	Aqara Presenza	Presenza	Home Assistant

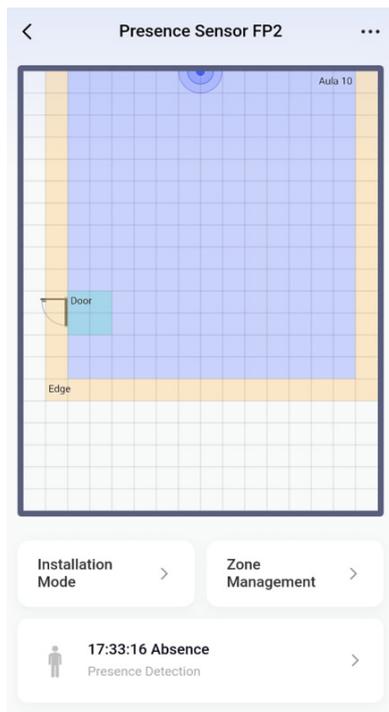
Ambiente Esterno			
Netatmo esterna	NE	T esterna, UR esterna	Netatmo



Posizionamento della Hobo 3 ad un'altezza di 1,90 m



Posizionamento "Hobo 8", "Hobo 9" e "Aqara Presenza" ad un'altezza di 1,60 m e "Aqara TVOC" ad un'altezza di 2,05 m, "Netatmo interna" ad un'altezza di 1,90 m



Area di rivelamento del sensore di presenza



Posizionamento del sensore Aranet4031ED ad un'altezza di 1,60 m e del sensore di apertura WD12



Sensore 4031ED

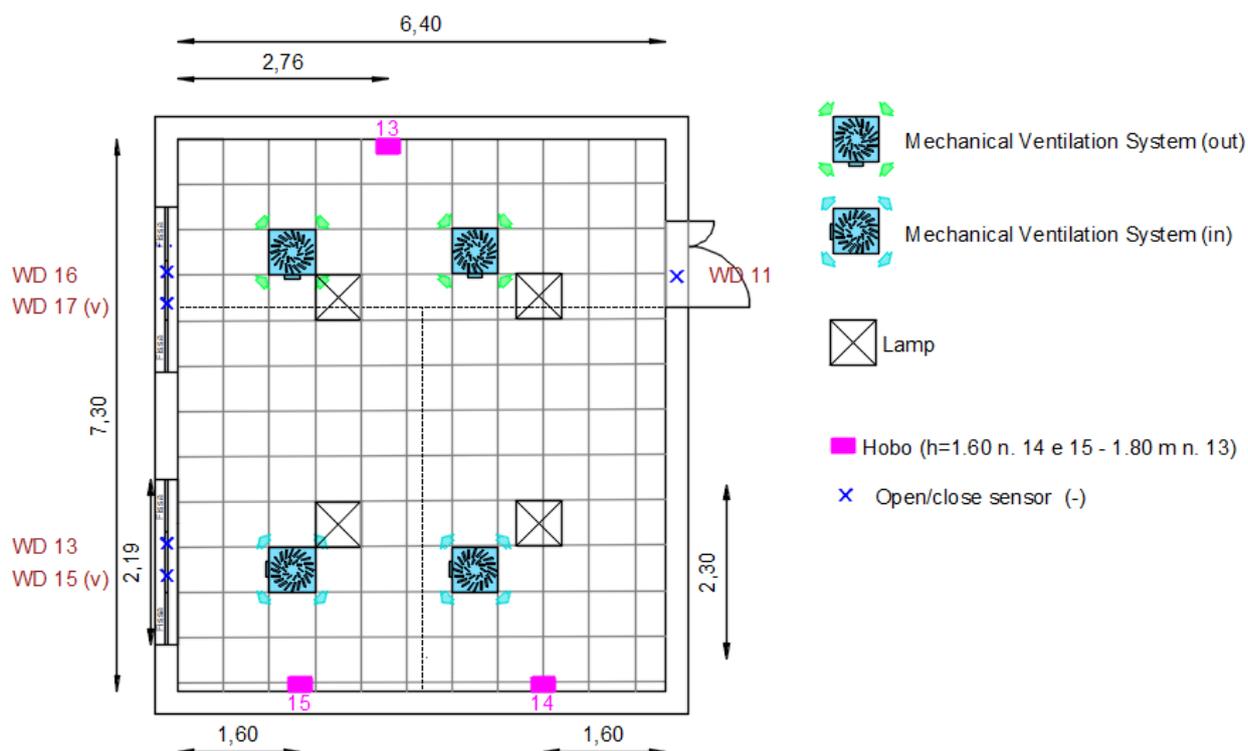


Sensore WD12 installato sulla porta



Posizionamento della "WD8" che segnala l'apertura completa della finestra e "WD9" che segnala l'apertura a vasistas della finestra

Sistema di monitoraggio aula 11



Aula 11 / Stanza 28				Dbeaver
Nome Sensore	Device Id	Identificativo Assegnato	Posizione nell'aula	
Shelly EM	44179321E336	EM3	Recuperatore (pinza su channel 1)	377 (overpowering), 378 (reboot), 376 (channel_1_energy), 315 (channel_1_energy_returned), 313 (channel_1_power), 317 (channel_1_power_factor), 316 (channel_1_voltage), 380 (channel_2_energy), 381 (channel_2_energy returned), 379 (channel_2_power), 382 (channel_2_power_factor), 321 (channel_2_voltage), 383 (switch)
Shelly Door/Window2	6F253B	WD13	Finestra F1 a battente	278 (o/c), 281 (battery), 279 (luminosity), 280 (temperature)
Shelly Door/Window2	6F2519	WD11	Porta	270 (o/c), 273 (battery), 271 (luminosity), 272 (temperature)
Shelly Door/Window2	6F24B3	WD15	Finestra F1 vasistas	286 (o/c), 289 (battery), 287 (luminosity), 288 (temperature)
Shelly Door/Window2	6F24B4	WD16	Finestra F2 a battente	290 (o/c), 446 (battery), 291 (luminosity), 292 (temperature)
Shelly Door/Window2	6F2199	WD17	Finestra F2 vasistas	294 (o/c), 297 (battery), 295 (luminosity), 296 (temperature)

Aula 11 / Stanza 24			
Nome Sensore	Numero Identificativo	Grandezza rilevate	Logger
HOBO	13	Tint,RH,CO2	HOBO
HOBO	14	Tint,RH,CO2	HOBO
HOBO	15	Tint,RH,CO2	HOBO
Shelly Door/Window2	WD13	AC,T	Home Assistant
Shelly Door/Window2	WD11	AC,T	Home Assistant
Shelly Door/Window2	WD15	AC,T	Home Assistant
Shelly Door/Window2	WD16	AC,T	Home Assistant
Shelly Door/Window2	WD17	AC,T	Home Assistant
Shelly 1PM	EM3	Energia,Potenza VMC	Home Assistant

Tipologia e posizionamento apparecchiature aula 11



Posizionamento delle Hobo 14 e 15 nell'aula 11



Posizionamento Hobo 13



Posizionamento sensori WD13 E WD15 per la finestra a sinistra e WD16 E WD17 per la finestra a destra. I sensori WD15 E WD17 indicano l'apertura a vasistas, i sensori WD13 E WD16 indicano l'apertura totale della finestra.

Misura e registrazione dei dati

I dati misurati dai sensori vengono registrati su numerosi data logger presenti. In questa fase i dati presenti sui data logger vengono trasferiti su un computer grazie ad un collegamento in rete. Il formato dei dati grezzi prodotti dai numerosi data logger è molto diverso, pertanto è necessario processarli per uniformarli.

VALIDAZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

Il processo di validazione ed elaborazione dei dati consiste nelle seguenti fasi:

1. Individuazione e correzioni dei dati anomali.
2. Riconduzione ad una stessa sintassi nel formato dei dati (utilizzo di separatori virgola o punto, utilizzo dello stesso formato numerico per le variabili).
3. Ricampionamento ad un periodo di 1 minuto dei campioni di tutti i sensori. Questo compito è stato svolto tramite la funzione "resample" di Python).

4. Allineamento temporale delle misure di tutti i sensori all'interno di una matrice che contiene tutti i dati raccolti.

La quantità di dati generati da un sistema di monitoraggio con periodo di campionamento di 1 minuto e che si estende su un arco temporale dell'ordine dei mesi, inoltre con un numero di variabili misurate molto alto, necessita di un sistema automatico di elaborazione dei dati in tutte le sue fasi, dalla registrazione, validazione, ricampionamento ed allineamento temporale.

La mole di dati è talmente elevata che l'uso di software tipo Excel risultano inadeguati, anche per la difficoltà di programmare macro di complessità eccessiva.

Queste operazioni vengono svolte più agevolmente con strumenti adeguati all'elaborazione di grandi quantità di dati e che hanno capacità di programmare compiti di complessità elevata. Si è trovato che Python è uno strumento adeguato allo scopo sebbene presenti una curva di apprendimento più ripida. Nello specifico il ricampionamento ad 1 minuto di tutti i campioni è stato eseguito mediante la funzione "resample" contenuta nella libreria "Pandas" di Python che esegue il ricampionamento di una sequenza di valori associati a timestamp.

Nel seguito si riporta a titolo di esempio l'elaborazione, mediante codice Python, dei campioni dei sensori di CO₂, RH e T registrati dal data logger Hobo 3.

Esempio di codice in Python per la elaborazione dei dati

```
[1]: import pandas as pd
[2]: dataset=pd.read_csv('Sensore_3_3_aprile_23_maggio_2024_05_23_16_42_28_UTC_1.csv')
[3]: dataset
[3]:
```

	line_num	date	temperature_3	RH_3	CO2_3
0	1	04/02/24 16:43:00	17.91	50.076	406.0
1	2	04/02/24 16:44:00	17.89	50.076	414.0
2	3	04/02/24 16:45:00	17.91	50.076	403.0
3	4	04/02/24 16:46:00	17.91	50.076	405.0
4	5	04/02/24 16:47:00	17.91	50.076	406.0
...
73280	73281	05/23/24 16:35:00	23.54	48.367	469.0
73281	73282	05/23/24 16:36:00	23.54	48.367	478.0
73282	73283	05/23/24 16:37:00	23.54	48.392	468.0
73283	73284	05/23/24 16:38:00	23.54	48.392	481.0
73284	73285	05/23/24 16:39:00	23.54	48.440	462.0

73285 rows x 5 columns

```
[84]: dataset.columns = ['line_num','date','temperature_3','RH_3','CO2_3']
[104]: dataset
[104]:
```

	line_num	date	temperature_3	RH_3	CO2_3
0	1	04/02/24 16:43:00	17.91	50.076	406.0
1	2	04/02/24 16:44:00	17.89	50.076	414.0
2	3	04/02/24 16:45:00	17.91	50.076	403.0
3	4	04/02/24 16:46:00	17.91	50.076	405.0
4	5	04/02/24 16:47:00	17.91	50.076	406.0
...
73280	73281	05/23/24 16:35:00	23.54	48.367	469.0
73281	73282	05/23/24 16:36:00	23.54	48.367	478.0
73282	73283	05/23/24 16:37:00	23.54	48.392	468.0
73283	73284	05/23/24 16:38:00	23.54	48.392	481.0
73284	73285	05/23/24 16:39:00	23.54	48.440	462.0

73285 rows x 5 columns

```
[105]: Sensore_3 = dataset [['date','temperature_3','RH_3','CO2_3']].dropna()
[106]: Sensore_3
[106]:
```

	date	temperature_3	RH_3	CO2_3
0	04/02/24 16:43:00	17.91	50.076	406.0
1	04/02/24 16:44:00	17.89	50.076	414.0
2	04/02/24 16:45:00	17.91	50.076	403.0
3	04/02/24 16:46:00	17.91	50.076	405.0
4	04/02/24 16:47:00	17.91	50.076	406.0
...
73280	05/23/24 16:35:00	23.54	48.367	469.0
73281	05/23/24 16:36:00	23.54	48.367	478.0
73282	05/23/24 16:37:00	23.54	48.392	468.0
73283	05/23/24 16:38:00	23.54	48.392	481.0
73284	05/23/24 16:39:00	23.54	48.440	462.0

73285 rows x 4 columns

```
[107]: Sensore_3['temperature_3'] = round(Sensore_3['temperature_3'], 2)
Sensore_3['RH_3'] = round(Sensore_3['RH_3'], 2)
[108]: Sensore_3
[108]:
```

	date	temperature_3	RH_3	CO2_3
0	04/02/24 16:43:00	17.91	50.08	406.0
1	04/02/24 16:44:00	17.89	50.08	414.0
2	04/02/24 16:45:00	17.91	50.08	403.0
3	04/02/24 16:46:00	17.91	50.08	405.0
4	04/02/24 16:47:00	17.91	50.08	406.0
...
73280	05/23/24 16:35:00	23.54	48.37	469.0
73281	05/23/24 16:36:00	23.54	48.37	478.0
73282	05/23/24 16:37:00	23.54	48.39	468.0
73283	05/23/24 16:38:00	23.54	48.39	481.0
73284	05/23/24 16:39:00	23.54	48.44	462.0

73285 rows x 4 columns

```
[38]: #energia[energia.columns[0]] = energia[energia.columns[0]].apply(pd.to_datetime, unit='s', errors='coerce')
# serve solo per convertire i timestamp UNIX in datetime se necessario
```

```
[109]: Sensore_3.set_index('date', inplace = True)
```

```
[110]: Sensore_3
```

```
[110]:
```

	temperature_3	RH_3	CO2_3
	date		
04/02/24 16:43:00	17.91	50.08	406.0
04/02/24 16:44:00	17.89	50.08	414.0
04/02/24 16:45:00	17.91	50.08	403.0
04/02/24 16:46:00	17.91	50.08	405.0
04/02/24 16:47:00	17.91	50.08	406.0
...
05/23/24 16:35:00	23.54	48.37	469.0
05/23/24 16:36:00	23.54	48.37	478.0
05/23/24 16:37:00	23.54	48.39	468.0
05/23/24 16:38:00	23.54	48.39	481.0
05/23/24 16:39:00	23.54	48.44	462.0

73285 rows x 3 columns

```
[112]: Sensore_3
```

```
[112]:
```

	temperature_3	RH_3	CO2_3
	date		
2024-04-02 16:43:00	17.91	50.08	406.0
2024-04-02 16:44:00	17.89	50.08	414.0
2024-04-02 16:45:00	17.91	50.08	403.0
2024-04-02 16:46:00	17.91	50.08	405.0
2024-04-02 16:47:00	17.91	50.08	406.0
...
2024-05-23 16:35:00	23.54	48.37	469.0
2024-05-23 16:36:00	23.54	48.37	478.0
2024-05-23 16:37:00	23.54	48.39	468.0
2024-05-23 16:38:00	23.54	48.39	481.0
2024-05-23 16:39:00	23.54	48.44	462.0

73285 rows x 3 columns

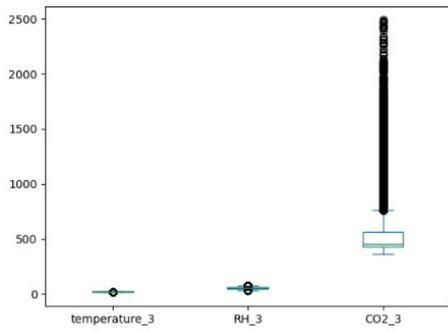
```
[113]: dataset.dtypes
```

```
[113]:
```

```
line_num      int64
date          object
temperature_3  float64
RH_3          float64
CO2_3         float64
dtype: object
```

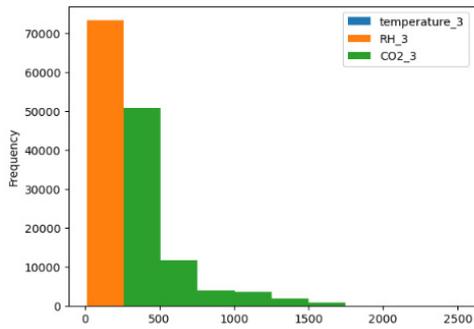
```
[114]: Sensore_3.plot.box()
```

```
[114]: <Axes: >
```



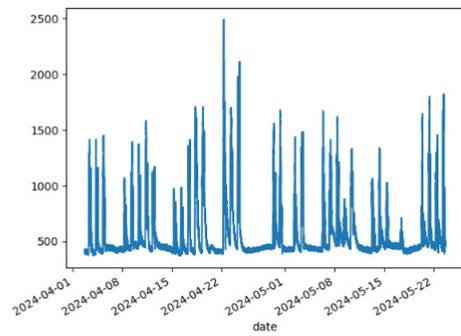
```
[115]: Sensore_3.plot.hist()
```

```
[115]: <Axes: ylabel='Frequency'>
```



```
[119]: Sensore_3[["CO2_3"]].plot()
```

```
[119]: <Axes: xlabel='date'>
```



```
[117]: Sensore_3.CO2_3
```

```
[117]: date
2024-04-02 16:43:00    486.0
2024-04-02 16:44:00    414.0
2024-04-02 16:45:00    403.0
2024-04-02 16:46:00    485.0
2024-04-02 16:47:00    486.0
...
2024-05-23 16:35:00    469.0
2024-05-23 16:36:00    478.0
2024-05-23 16:37:00    468.0
2024-05-23 16:38:00    481.0
2024-05-23 16:39:00    462.0
Name: CO2_3, Length: 73285, dtype: float64
```

```
[125]: Sensore_3[["temperature_3", "RH_3"]]
```

```
[125]:
```

	temperature_3	RH_3
date		
2024-04-02 16:43:00	17.91	50.08
2024-04-02 16:44:00	17.89	50.08
2024-04-02 16:45:00	17.91	50.08
2024-04-02 16:46:00	17.91	50.08
2024-04-02 16:47:00	17.91	50.08
...
2024-05-23 16:35:00	23.54	48.37
2024-05-23 16:36:00	23.54	48.37
2024-05-23 16:37:00	23.54	48.39
2024-05-23 16:38:00	23.54	48.39
2024-05-23 16:39:00	23.54	48.44

73285 rows x 2 columns

```
[135]: Sensore_3_aprile_23_maggio_2024_05_23_16_42_28_UTC_1_resampled = pd.DataFrame() #creo dataframe vuoto
Sensore_3_aprile_23_maggio_2024_05_23_16_42_28_UTC_1_resampled[['temperature_3_media_no_riempimento', 'RH_3_media_no_riempimento', 'CO2_3_media_no_riempimento']] = Sensore_3.resample('1min').mean()
Sensore_3_aprile_23_maggio_2024_05_23_16_42_28_UTC_1_resampled[['temperature_3_media_riempimento', 'RH_3_media_riempimento', 'CO2_3_media_riempimento']] = Sensore_3.resample('1min').mean().ffill()
Sensore_3_aprile_23_maggio_2024_05_23_16_42_28_UTC_1_resampled[['temperature_3_max_no_riempimento', 'RH_3_max_no_riempimento', 'CO2_3_max_no_riempimento']] = Sensore_3.resample('1min').max()
Sensore_3_aprile_23_maggio_2024_05_23_16_42_28_UTC_1_resampled[['temperature_3_max_riempimento', 'RH_3_max_riempimento', 'CO2_3_max_riempimento']] = Sensore_3.resample('1min').max().ffill()

[136]: Sensore_3_aprile_23_maggio_2024_05_23_16_42_28_UTC_1_resampled

[137]:
```

	temperature_3_media_no_riempimento	RH_3_media_no_riempimento	CO2_3_media_no_riempimento	temperature_3_media_riempimento	RH_3_media_riempimento	CO2_3_media_riempimento	temperature_3_max_no_riempimento	RH_3_max_no_riempimento	CO2_3_max_no_riempimento
date									
2024-04-02 16:43:00	17.91	50.08	406.0	17.91	50.08	406.0	17.91	50.08	406.0
2024-04-02 16:44:00	17.89	50.08	414.0	17.89	50.08	414.0	17.89	50.08	414.0
2024-04-02 16:45:00	17.91	50.08	403.0	17.91	50.08	403.0	17.91	50.08	403.0
2024-04-02 16:46:00	17.91	50.08	405.0	17.91	50.08	405.0	17.91	50.08	405.0
2024-04-02 16:47:00	17.91	50.00	406.0	17.91	50.00	406.0	17.91	50.00	406.0
...
2024-05-23 16:35:00	23.54	48.37	469.0	23.54	48.37	469.0	23.54	48.37	469.0
2024-05-23 16:36:00	23.54	48.37	478.0	23.54	48.37	478.0	23.54	48.37	478.0
2024-05-23 16:37:00	23.54	48.39	468.0	23.54	48.39	468.0	23.54	48.39	468.0
2024-05-23 16:38:00	23.54	48.39	481.0	23.54	48.39	481.0	23.54	48.39	481.0
2024-05-23 16:39:00	23.54	48.44	482.0	23.54	48.44	482.0	23.54	48.44	482.0

72437 rows x 10 columns

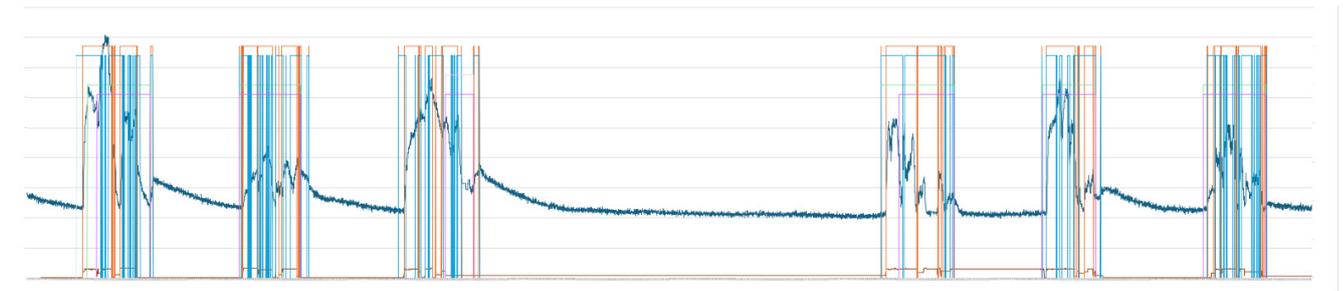
```
[138]: Sensore_3_aprile_23_maggio_2024_05_23_16_42_28_UTC_1_resampled.to_csv('Sensore_3_aprile_23_maggio_2024_05_23_16_42_28_UTC_1_ricampionato.csv')
```

Studio delle grandezze misurate per la valutazione della ventilazione nel dominio del tempo

E stata eseguita la rappresentazione grafica degli andamenti nel tempo delle principali grandezze misurate per una settimana presa nell'intervallo di monitoraggio: 8-15 maggio (da mercoledì a mercoledì della settimana successiva)

Aula 10

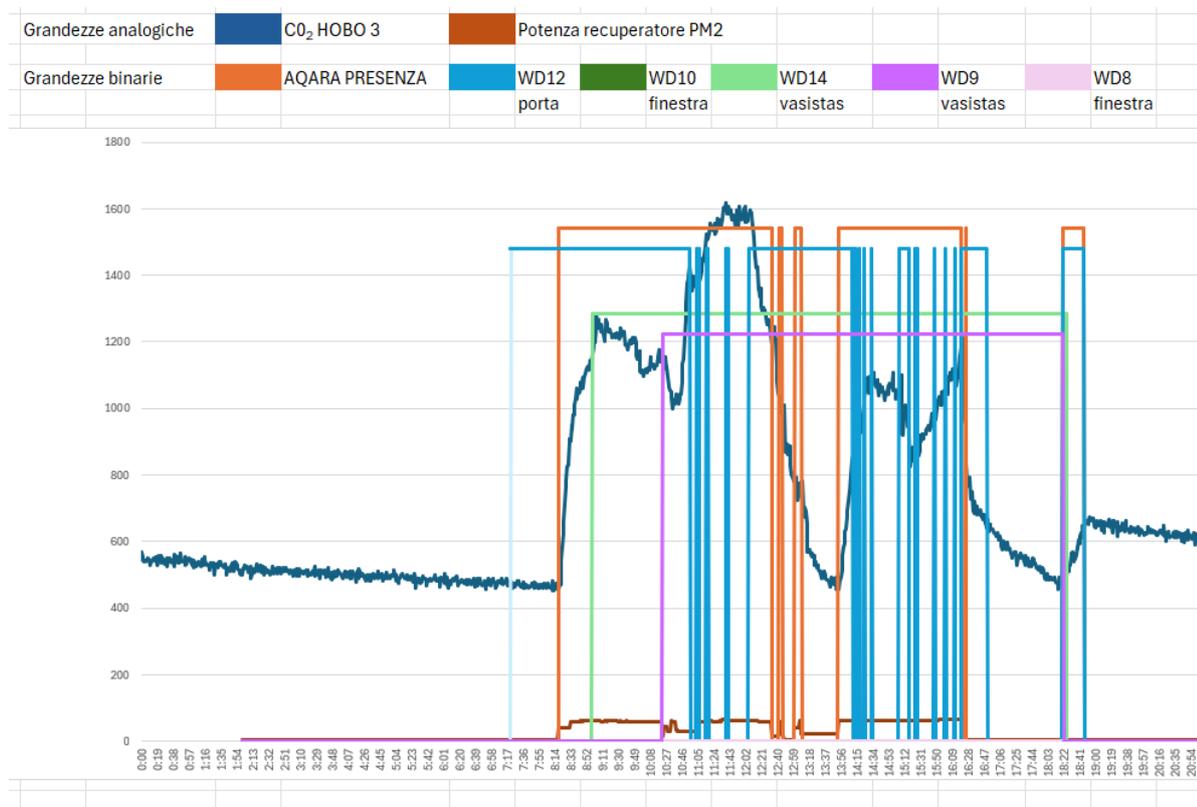
E stata eseguita la rappresentazione grafica degli andamenti nel tempo delle principali grandezze misurate nell'aula 10 nella settimana 8-15 maggio (da mercoledì a mercoledì della settimana successiva)



Nel seguito sono raccolte le rappresentazioni grafiche delle singole giornate per maggiore visibilità

Per rappresentare in maniera chiara le grandezze binarie (presenza, porta, finestre) sono stati assegnati valori diversi di altezza per evitare sovrapposizioni e migliorare la leggibilità del grafico.

Valutazioni relative alle misure della giornata di mercoledì 8 maggio



L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 10 nella giornata di mercoledì, primo giorno della settimana osservata

Gli utenti aprono entrambi i vasistas (WD14 E WD9) per quasi tutto il tempo di permanenza nell'aula, anche la porta rimane aperta per gran parte del tempo (WD12). Si osserva che l'efficacia della ventilazione aumenta notevolmente quando, oltre ai vasistas, viene aperta anche la porta. Infatti ad esempio si osserva che alle ore 11:05, alla chiusura della porta, nonostante siano aperti entrambi i vasistas, vi è una crescita della CO₂ che poi si raggiunge valori abbastanza alti (circa 1600 ppm). Alle ore 12, quando la porta viene riaperta, vi è una rapida discesa della curva di CO₂. Tale discesa non è attribuibile all'assenza di persone nell'aula, quindi è sicuramente dovuta all'apertura della porta.

Da questo si può concludere che nel periodo compreso tra le 11:05 e le 12:00 i due vasistas da soli non sono sufficienti a tenere la CO₂ a valori ottimali. Il valore ottimale di CO₂ considerato è di 1200 ppm, corrispondente alla Categoria II della UNI EN 16798-1.

Dal grafico inoltre appare evidente la correlazione tra andamento della CO₂ e la presenza degli utenti.

A spiegazione di ciò si osserva un veloce decremento dell'andamento della CO₂ nell'intervallo compreso tra le 12:36 e le 13:48, corrispondente con l'uscita degli utenti dall'aula per la mensa. Stessa cosa si registra quando gli utenti escono perché la giornata scolastica è terminata.

Nel grafico è stata inoltre plottata la potenza del recuperatore PM2, la quale rivela la logica di controllo utilizzata.

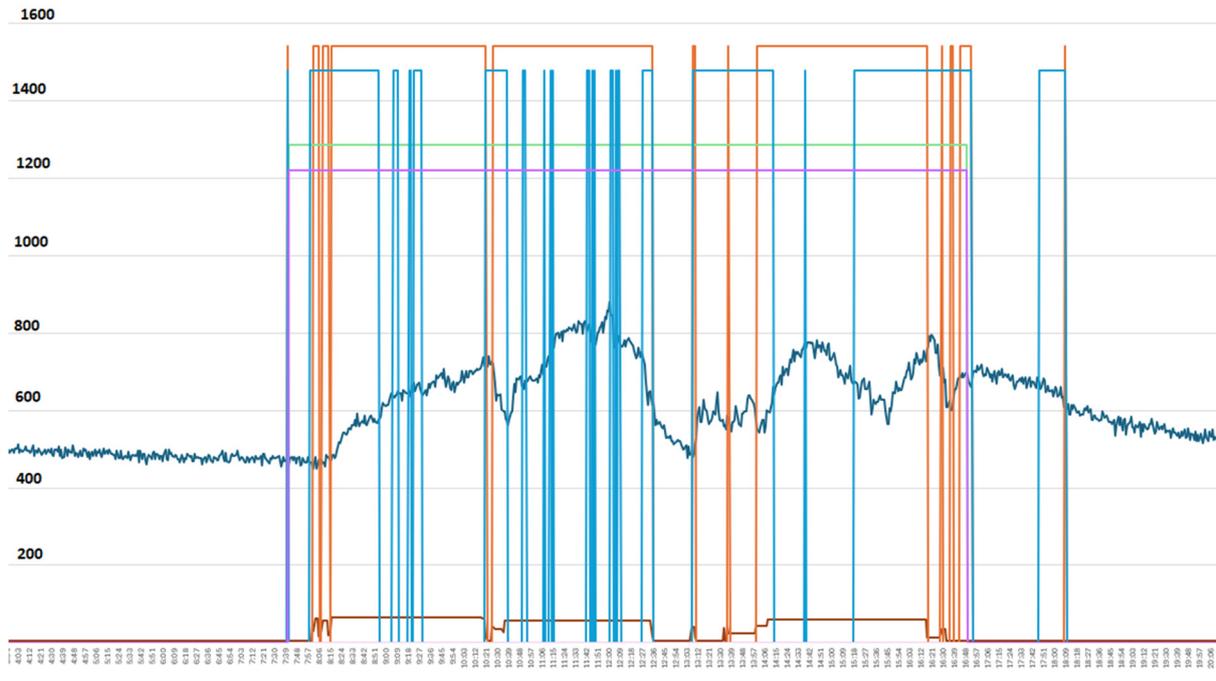
Si nota che vi è una modulazione della potenza, spiegato dal fatto che vi sono due strategie di controllo che agiscono contemporaneamente:

- La prima basata su un programmatore settimanale che consente al recuperatore di funzionare solo negli orari in cui sono previste attività (8:20 - 16:20 dal lunedì al venerdì).
- La seconda basata sul rivelatore di presenza che agisce attenuando la portata del recuperatore in assenza di persone.

Le seguenti considerazioni sono state fatte considerando il profilo di occupazione degli utenti all'interno dell'aula:

Classe 5° (in verde assenza occupanti solo il mercoledì)									
8:15-8:20	8:20-9:20	9:20-10:20	10:20-10:35	10:35-11:20	11:20-12:20	12:20-14:00	14:00-15:20	15:20-16:15	16:15-16:20
Ingresso	Lezione	Lezione	Ricreazione	Lezione	Lezione	Mensa	Lezione	Lezione	Uscita
				SOLO IL MERCOLEDÌ (PALESTRA)					

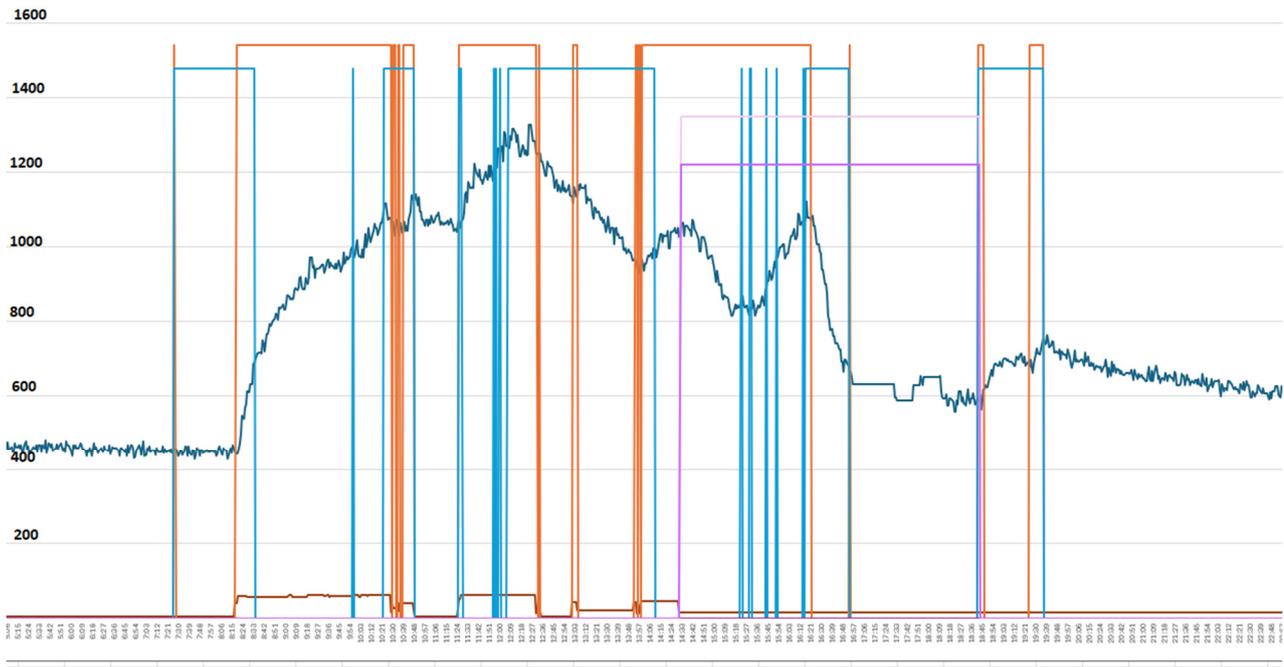
Valutazioni relative alle misure della giornata di giovedì 9 maggio



L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 10 nella giornata di giovedì

In questa giornata la concentrazione di CO₂ ha raggiunto concentrazioni massime di circa 800 ppm. Per tutto il periodo di occupazione sono rimaste sempre aperti i entrambi i vasistas e occasionalmente la porta. Si può ipotizzare che l'ottimo controllo della CO₂ sia da attribuire a condizioni di ventilazione esterne favorevoli all'aerazione. L'ipotesi può essere suffragata dal fatto che gli utenti, al contrario della giornata di mercoledì hanno preferito mantenere la porta chiusa, probabilmente per evitare correnti d'aria che recano fastidio alle attività.

Valutazioni relative alle misure della giornata di venerdì 10 maggio



L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 10 nella giornata di venerdì

Si osserva un picco di 1300 ppm di breve durata.

In questa giornata si osserva che nell'intervallo tra l'ingresso degli alunni, alle ore 8:20, e le ore 10:20, quando viene aperta la porta, rimangono chiuse tutte le aperture dell'aula, compresa la porta. Il contenimento della CO₂ è affidato alla ventilazione meccanica che è riuscita a contenere la velocità di salita della CO₂. Non si sono raggiunti valori molto elevati in quanto, all'inizio delle lezioni la concentrazione di partenza era quella dell'aria pura.

Dopo un consistente periodo di assenza, ove si osserva una discesa della concentrazione dell'inquinante, al ritorno dalla mensa, vengono aperte una finestra e un vasistas e si osserva uno slope negativo per la CO₂.

Valutazioni relative alle misure della giornata di lunedì 13 maggio

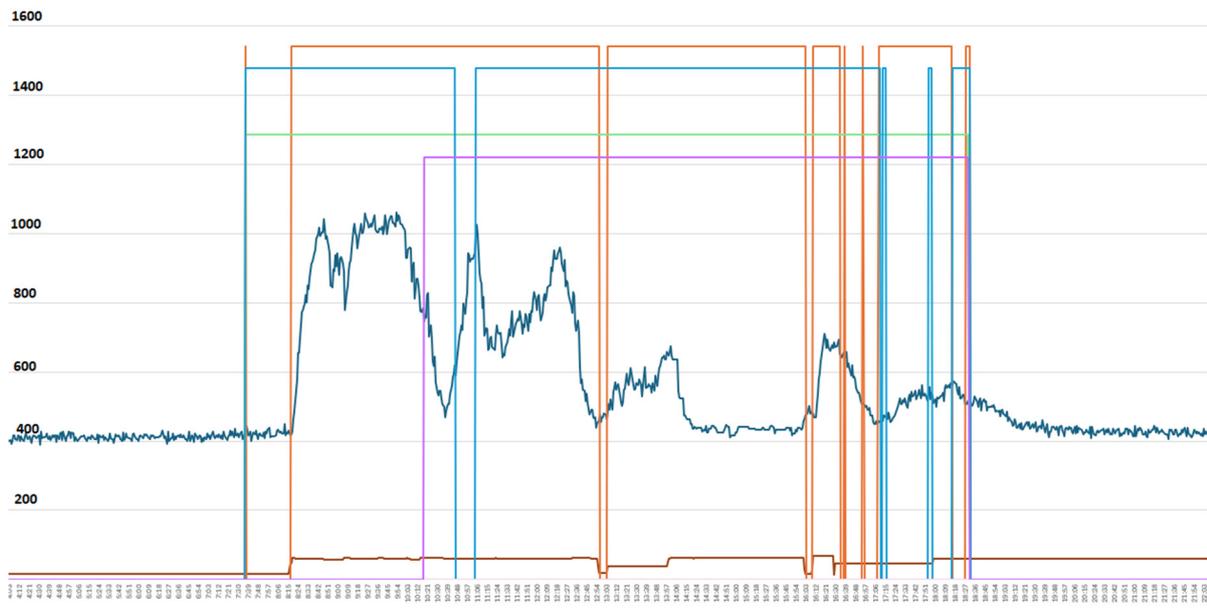
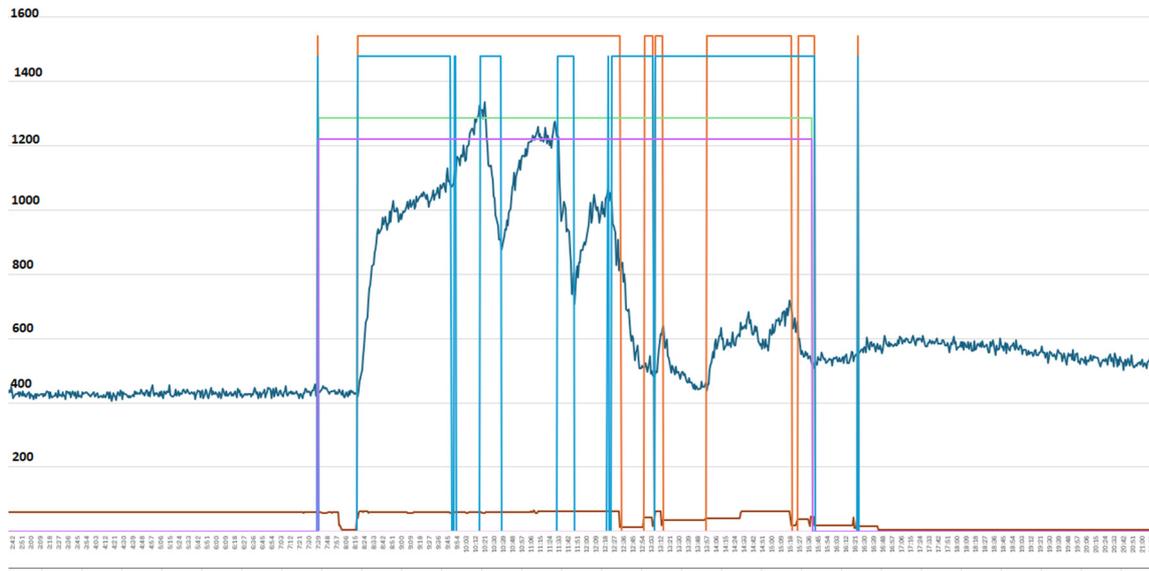


Figura 1 L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 10 nella giornata di lunedì

In questa giornata la concentrazione di CO₂ resta sempre sotto i 1000 ppm. Durante tutta la giornata la ventilazione meccanica viene promossa dalla apertura quasi costante dei vasistas e della porta. Si verifica addirittura un plateau di circa un'ora e mezza a circa 420 ppm che si possono spiegare con il verificarsi di condizioni particolarmente favorevoli per la ventilazione meccanica e l'apertura contemporanea di porta e vasistas.

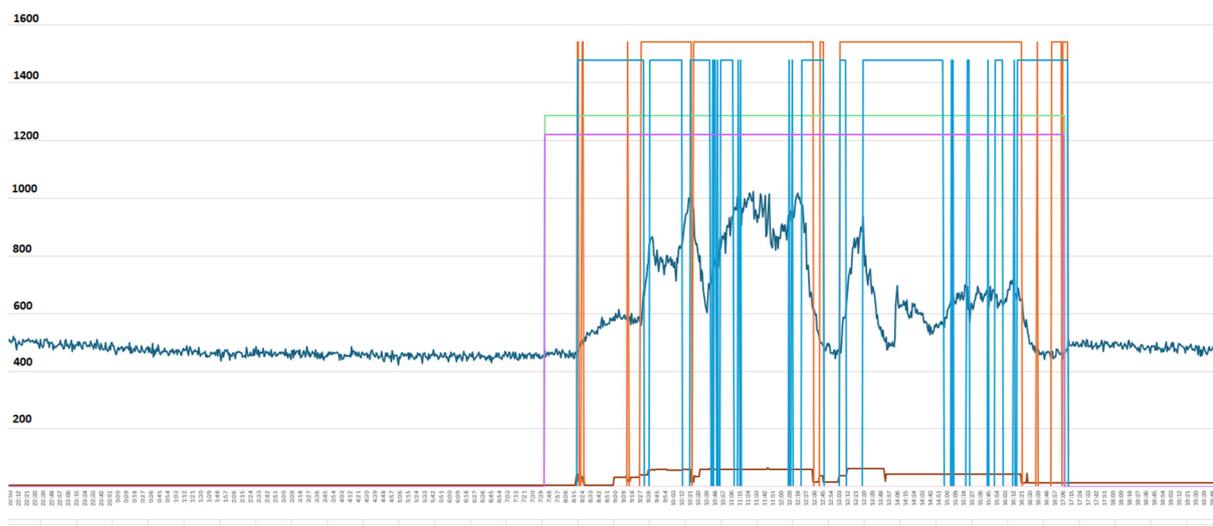
Valutazioni relative alle misure della giornata di martedì 14 maggio



L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 10 nella giornata di martedì

In questa giornata la concentrazione di CO₂ rimane contenuta quasi perfettamente nel limite dei 1200 ppm, grazie apertura costante dei vasistas per buona parte del tempo, della porta. Il buon andamento si spiega probabilmente anche con il verificarsi di buone condizioni esterne per la ventilazione naturale.

Valutazioni relative alle misure della giornata di mercoledì 15 maggio



L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 10 nella giornata di mercoledì, ultimo giorno della settimana osservata

In questa giornata la concentrazione di CO₂ rimane contenuta in 1000 ppm. Anche in questa giornata entrambi i vasistas restano sempre aperti e la porta per buona parte della giornata. Il comportamento del grafico evidenzia ancora una volta che la ventilazione naturale, in giornate favorevoli, e con la porta aperta garantisce un buon livello di lavaggio dell'aula.

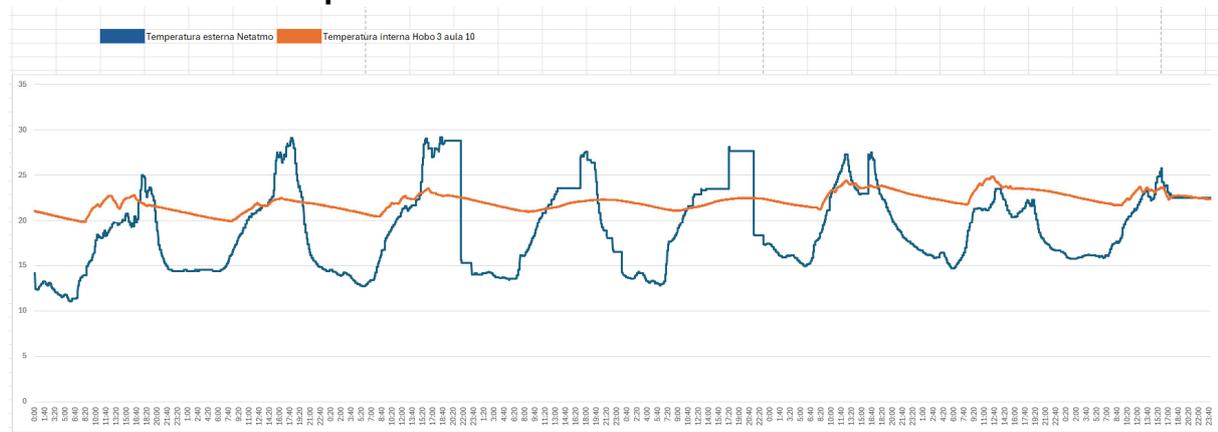
Osservazioni conclusive sullo studio del comportamento edificio-impianto nel dominio del tempo

Si osserva che in quasi tutte le giornate per assicurare un livello sufficiente di ventilazione è necessario che siano aperti contemporaneamente almeno i due vasistas e la porta. A conferma di questa conclusione vi è il comportamento non favorevole della giornata di mercoledì 8 maggio, quando la mancata apertura della porta ha portato il valore di CO₂ fino a 1600 ppm.

Considerato che tenere la porta aperta durante le attività potrebbe essere controindicato per lo svolgimento delle attività, andrebbe presa in considerazione la possibilità di aumentare la superficie di ventilazione degli infissi e scegliere un tipo di apertura che riduca la formazione di fastidiose correnti d'aria nella zona occupata. Si è osservato infatti che gli utenti hanno manifestato l'abitudine a fare scarsissimo ricorso all'apertura delle finestre, preferendo l'apertura dei vasistas.

La superficie di aerazione utilizzata è stata dunque abbastanza piccola e si è osservato che l'apertura contemporanea della porta a quella dei vasistas è stata determinante per ottenere i buoni risultati raggiunti.

Andamenti della temperatura esterna ed interna

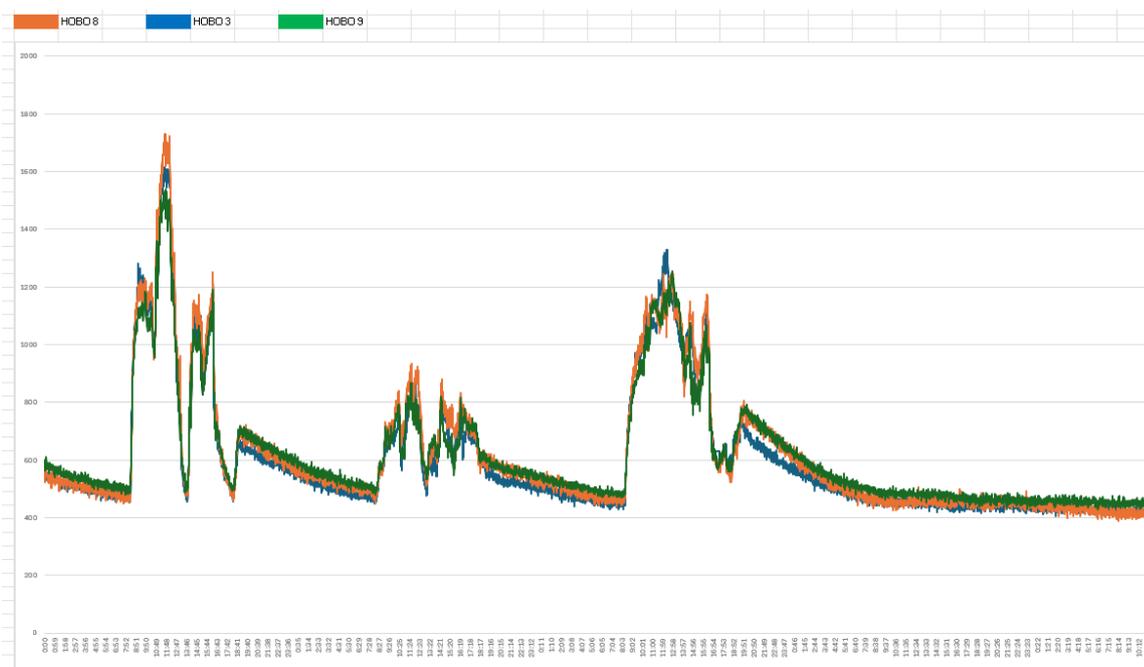


Andamento della temperatura esterna dal sensore Netatmo e della temperatura interna dall'Hobo 3

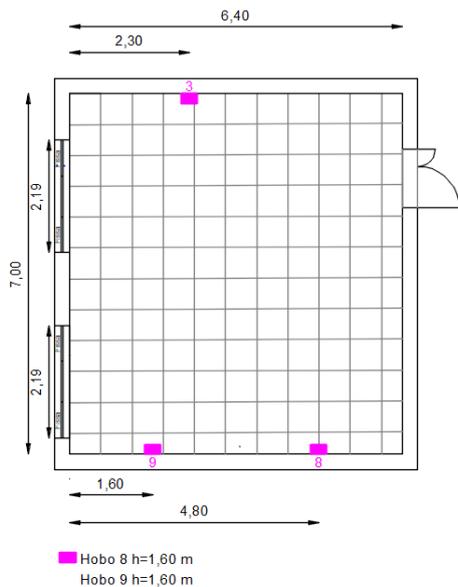
Il grafico della temperatura interna ha un aspetto tipicamente quasi sinusoidale con periodo giornaliero e sfasamento dovuto all'inerzia termica dell'edificio. Questo comportamento è molto evidente soprattutto sabato e domenica quando la ventilazione è assente per la chiusura di tutte le aperture e delle porte.

Negli altri giorni della settimana la regolarità della sinusoide viene modificata dalla presenza della ventilazione. Nella settimana di osservazione la temperatura all'interno dell'aula oscilla tra i 20 ed i 22 °C, mentre quella esterna nelle ore di utilizzo dell'edificio non supera i 28 °C con medie non troppo distanti dai 26°C, pertanto siamo nelle condizioni nelle quali l'apertura delle finestre porta ad un miglioramento delle condizioni di benessere. Infatti a finestre aperte si ha un lieve aumento della temperatura nella direzione nella quale normalmente gli individui mostrano maggiori condizioni di comfort (si passa dai 20°C- 21°C all'inizio della giornata di occupazione a finestre chiuse, a temperature che salgono fino ai 24 °C a seguito dell'apertura delle finestre). Pertanto gli occupanti sono portati naturalmente ad utilizzare al meglio la ventilazione naturale perché i benefici immediatamente percepibili sul comfort climatico li spingono in tale direzione con riflessi positivi anche per la qualità dell'aria.

Differenza tra i valori di CO2 acquisiti dalla hobo 3, hobo 8 e hobo 9 all'interno dell'aula 10



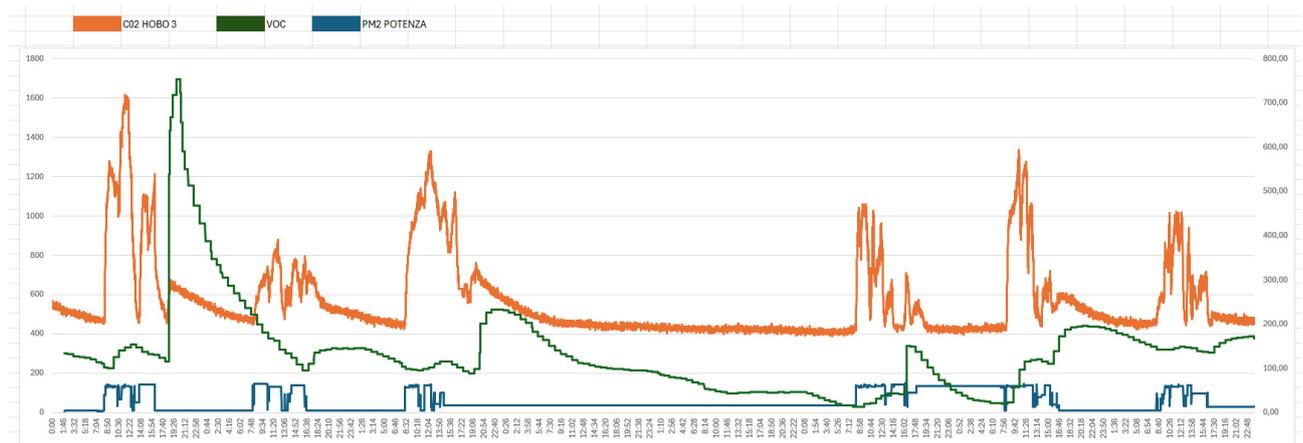
L'andamento della CO2 per la Hobo 3, 8 e 9 nei primi tre giorni della settimana analizzata



Posizione della Hobo 3, 8 e 9 dell'aula 10

Si riscontra una certa differenza tra le varie misurazioni durante i picchi di concentrazione della CO₂, la Hobo 8 registra i valori più alti, la cosa può essere spiegata dal fatto che quest'ultima si trova in una posizione meno interessata ai flussi di ventilazione, più riparata rispetto alle aperture, come si nota nella pianta qui di fianco riportata. Durante i periodi di occupazione, con ventilazione naturale attiva, si osserva che il sensore che misura la concentrazione più alta è la Hobo 8.

Confronto tra i valori di CO₂ (hobo 3), voc e potenza del recuperatore



Andamento del valore di CO₂ dell'Hobo 3, VOC e potenza del recuperatore

Si osserva che la concentrazione dei VOC è abbastanza correlata con le attività svolte piuttosto che con le emissioni intrinseche dell'ambiente in quanto essa decresce sempre durante la pausa notturna fino a raggiungere valori molto bassi all'inizio delle attività

Le concentrazioni dei TVOC sono quasi sempre sotto i valori di attenzione (250 ppb) si osservano valori superiori per brevi periodi quando la ventilazione viene a mancare per l'assenza di occupanti.

Gi aumenti della concentrazione di VOC osservati alla fine dell'occupazione delle aule, probabilmente dovuti al fatto che alla fine delle lezioni si eseguono operazioni di pulizia anche con l'impiego di prodotti chimici.

Andamento dell'energia assorbita dal recuperatore

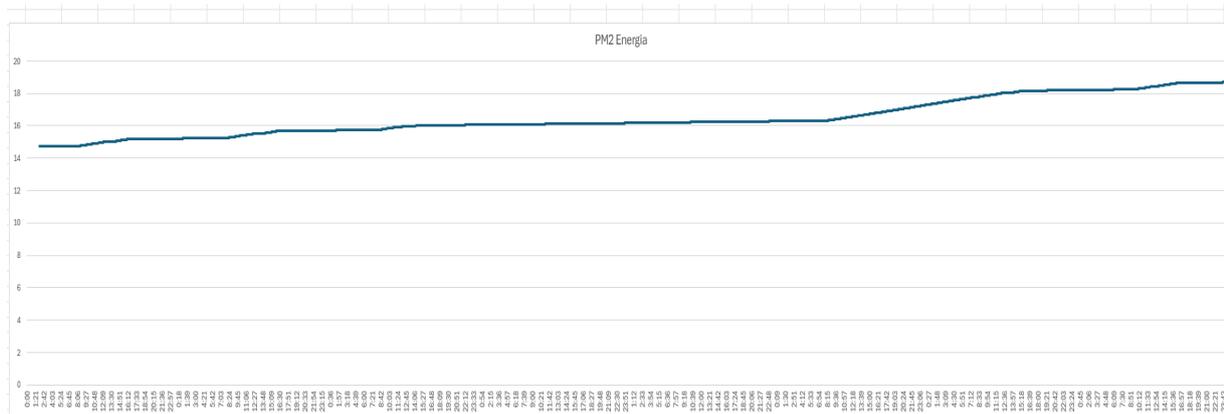
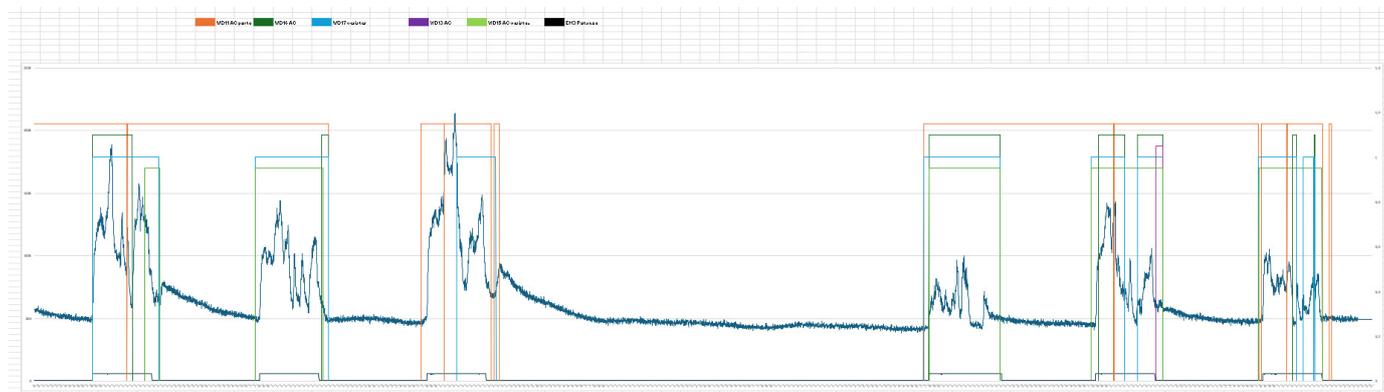


Figura 2 Andamento della energia assorbita dalla VMC per l'aula 10 nella settimana 8-15 maggio

Si rileva che l'energia spesa per ventilazione dal recuperatore, considerato che la VMC rimane accesa solo quando l'edificio è occupato è di 2,99 kWh.

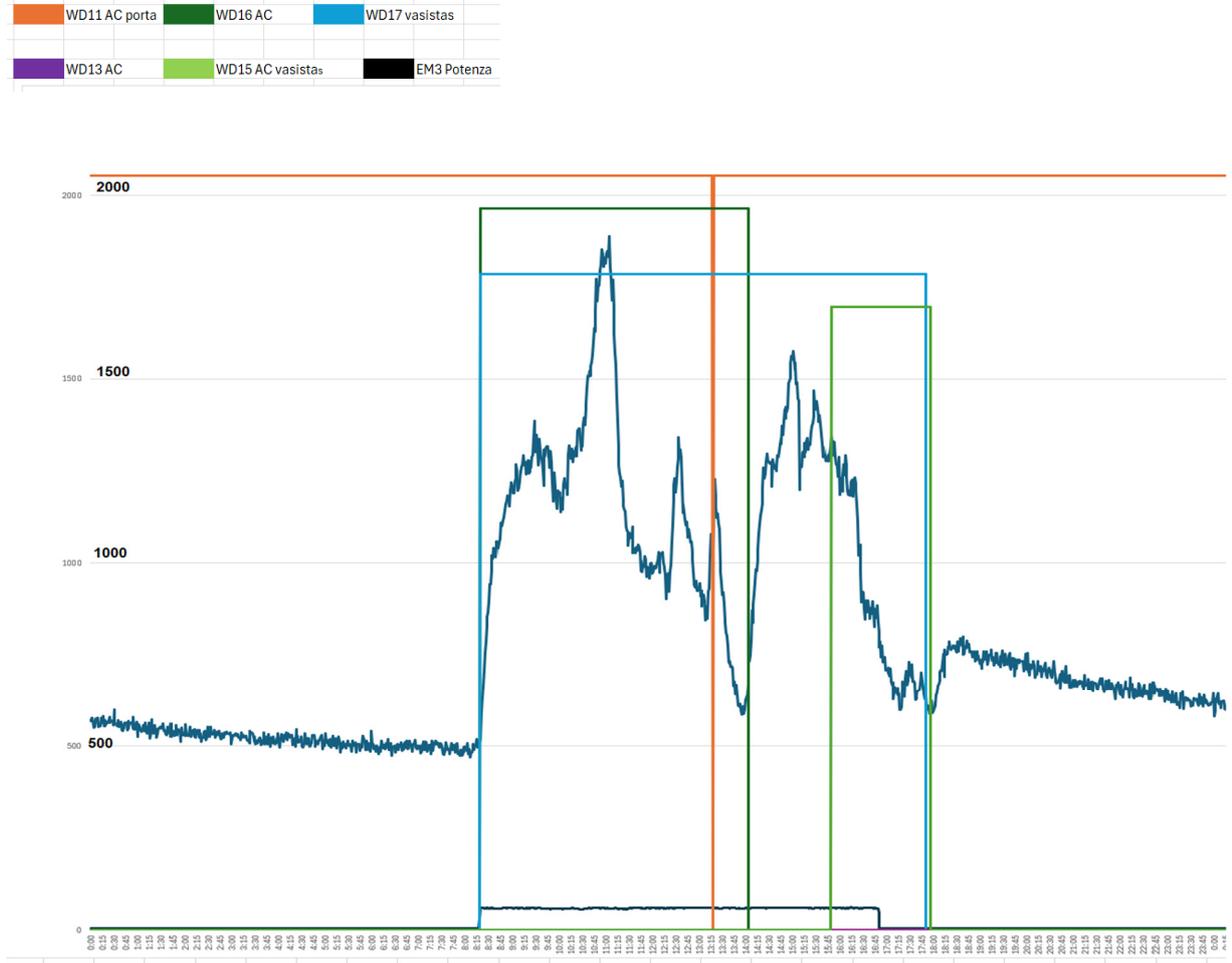
Aula 11

Riportiamo la rappresentazione grafica degli andamenti delle principali grandezze misurate nell'aula 11 nella settimana 8-15 maggio (da mercoledì a mercoledì della settimana successiva)



Nel seguito sono raccolte le rappresentazioni grafiche delle singole giornate per maggiore visibilità:

Valutazioni relative alle misure della giornata di mercoledì 8 maggio



L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 11 nella giornata di mercoledì

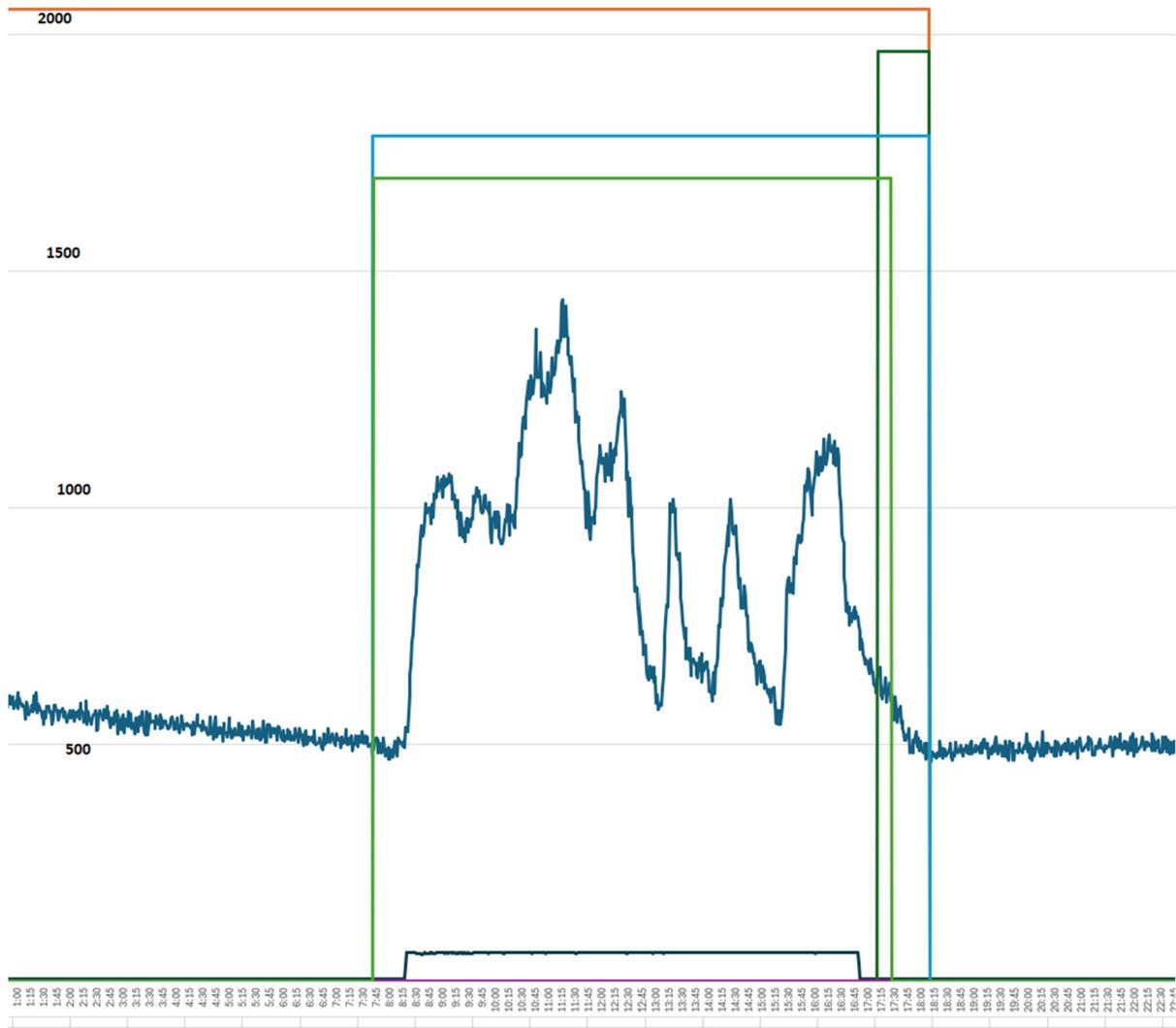
La CO2 è rimasta per buona parte del tempo sotto il valore di soglia grazie alla apertura di porta e finestre per buona parte del tempo. Si osserva un picco di breve durata che eccede il valore di soglia.

A differenza dell'aula 10, nell'aula 11 non vi è una modulazione della portata del recuperatore, ma la logica di controllo installata è ad orari: l'accensione è prevista per le ore 8:20 e lo spegnimento alle ore 16:48.

I profili di occupazione degli utenti all'interno dell'aula sono:

Classe 4 [°] (in celeste assenza occupanti solo il lunedì)									
8:15-8:20	8:20-9:20	9:20-10:20	10:20-10:35	10:35-11:20	11:20-12:20	12:20-14:00	14:00-15:20	15:20-16:15	16:15-16:20
Ingresso	Lezione	Lezione	Ricreazione	Lezione	Lezione	Mensa	Lezione	Lezione	Uscita
SOLO IL LUNEDÌ (TEATRO)							SOLO IL LUNEDÌ (PALESTRA)		

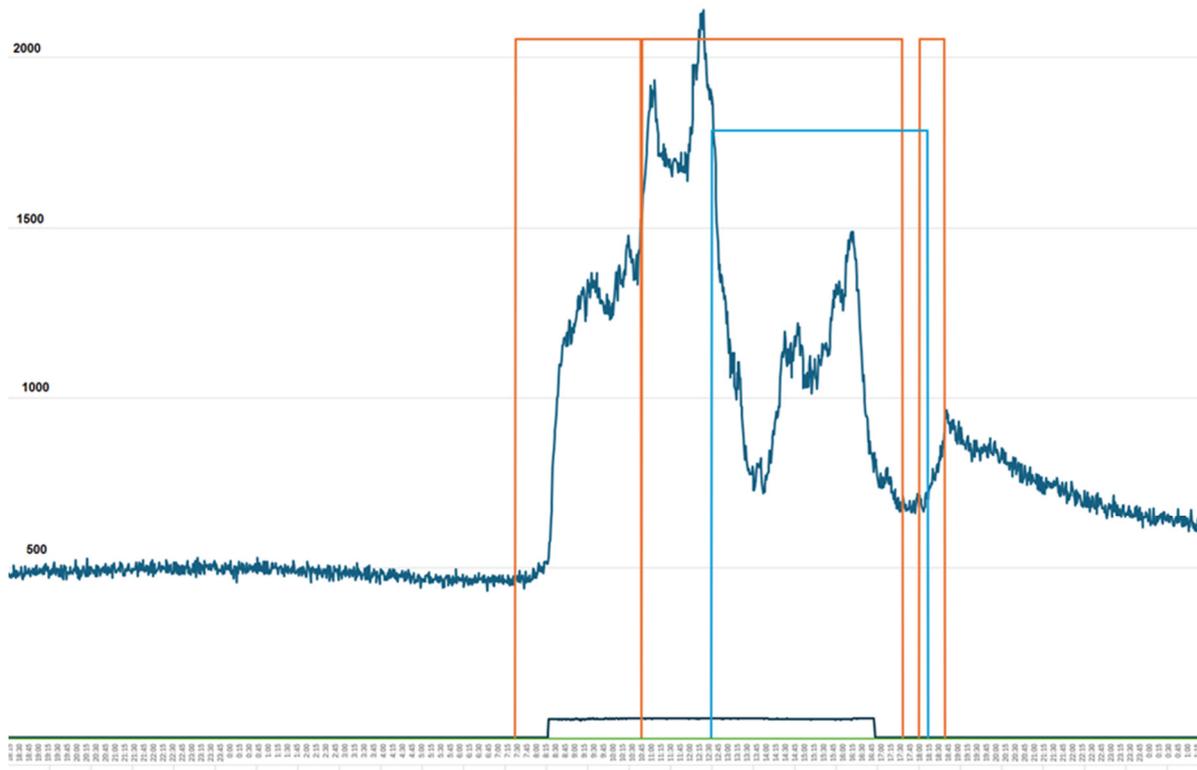
Valutazioni relative alle misure della giornata di giovedì 9 maggio



L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 11 nella giornata di giovedì

Per tutta la giornata sono rimasti aperti i vasistas e la porta. Questo ha consentito di rimanere quasi sempre sotto il valore di soglia.

Valutazioni relative alle misure della giornata di venerdì 10 maggio

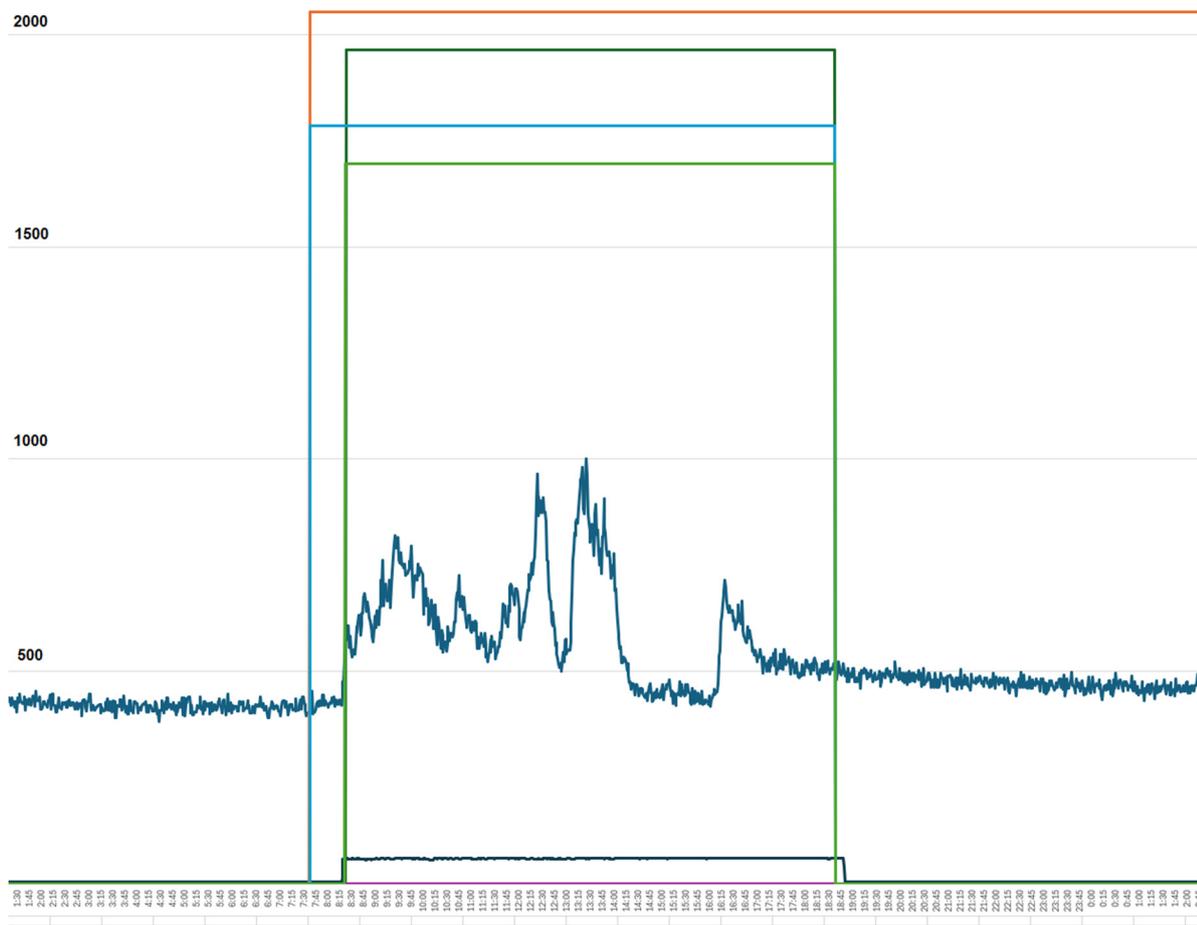


L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 11 nella giornata di venerdì

Il grafico mostra che in assenza di apertura delle finestre, ma della sola porta il valore di soglia viene superato. Si osserva che all'apertura di un solo vasistas e della porta si verifica una veloce discesa della concentrazione di CO₂.

Dal grafico è evidente che non è sufficiente l'apertura della sola porta per contenere la concentrazione di CO₂ a livelli accettabili, ma è necessaria la contemporanea apertura della finestra a vasistas e della porta per notare un decremento dell'andamento della CO₂ dell'aula.

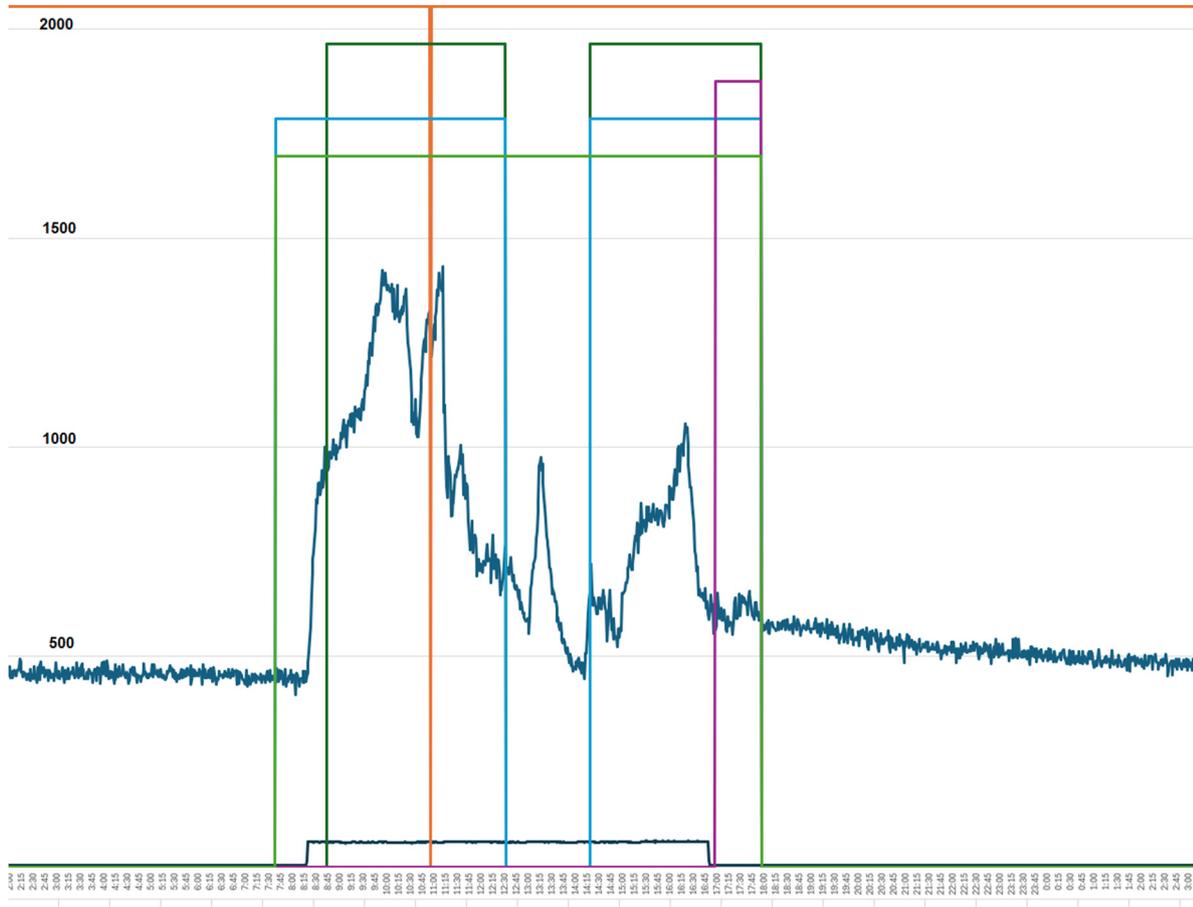
Valutazioni relative alle misure della giornata di lunedì 13 maggio



L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 11 nella giornata di lunedì

In questa giornata sono rimaste aperte per tutto il tempo una finestra, un vasistas e la porta. Questo ha consentito di tenere i valori di CO2 ampiamente sotto il valore di soglia

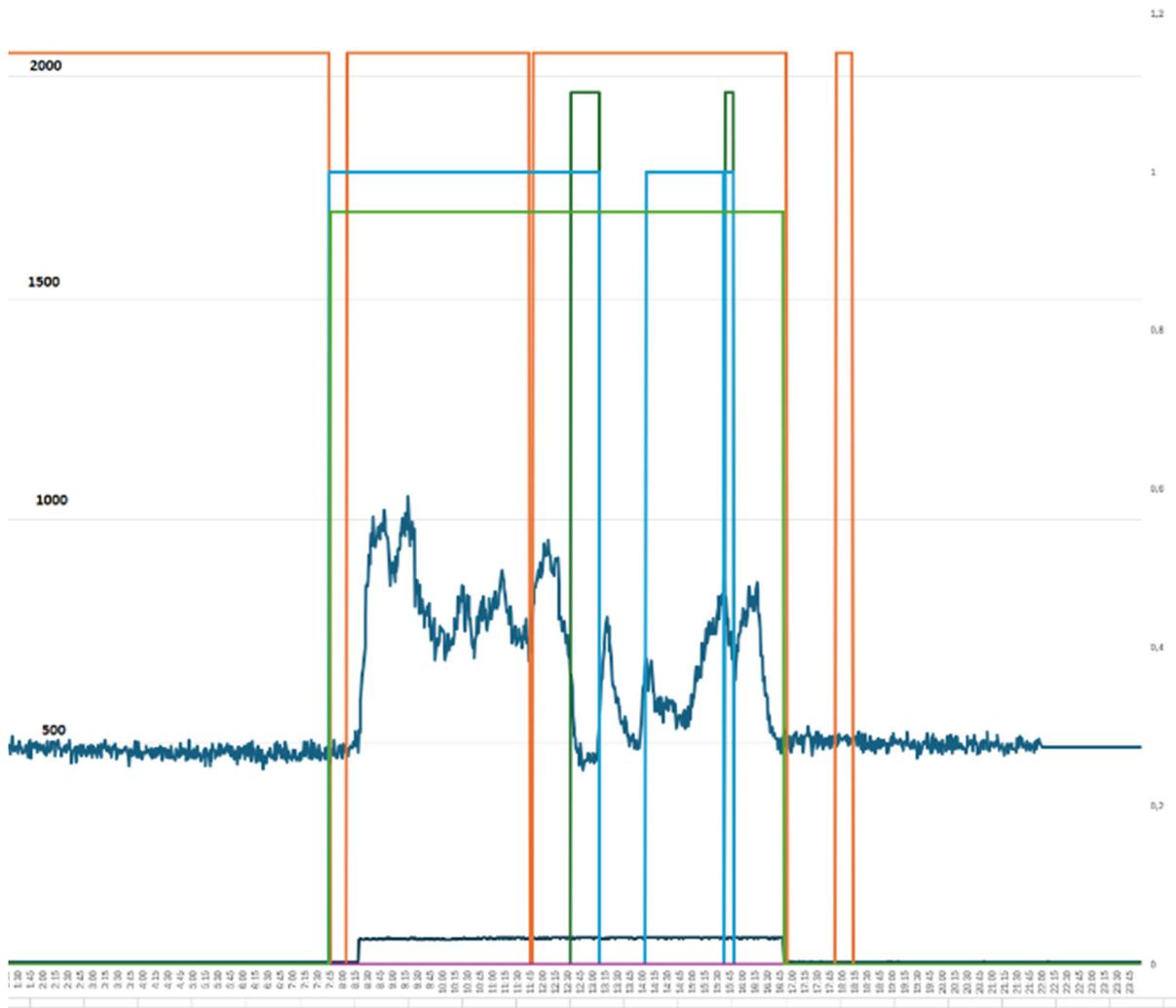
Valutazioni relative alle misure della giornata di martedì 14 maggio



L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 11 nella giornata di martedì

Sono rimaste aperte per quasi tutto il giorno sia le finestre che la porta. La CO₂ è rimasta per quasi tutto il tempo sotto il valore di soglia. Si osserva tuttavia che per un periodo di tempo non troppo lungo, vi è stato un superamento non troppo elevato della soglia. Le cause possono essere ricercate nella aleatorietà delle condizioni esterne che costituiscono il motore della ventilazione naturale oppure per un occasionale incremento delle attività degli occupanti.

Valutazioni relative alle misure della giornata di mercoledì 15 maggio



L'andamento delle principali grandezze misurate nell'aula 11 nella giornata di mercoledì

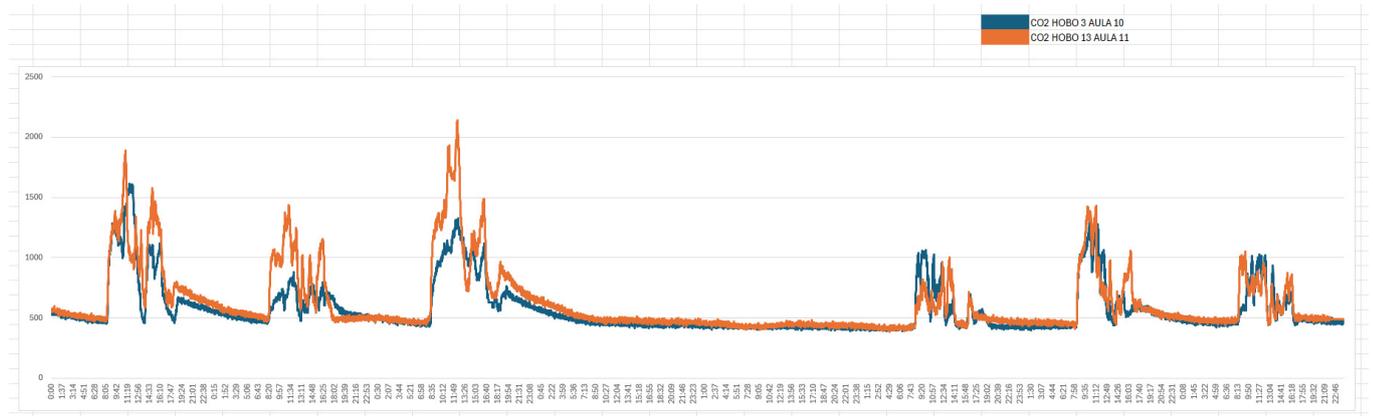
Durante la giornata sono rimaste aperte per quasi tutto il tempo sia la porta che le aperture esterne. I valori di CO₂ sono rimasti sempre ampiamente sotto soglia.

Energia assorbita dal recuperatore per l'aula 11

L'energia assorbita dal recuperatore nell'aula 11 nella settimana osservata (dall'8 al 15 maggio) risulta essere 3,88 kWh.

Quindi si deduce che l'aula 11 ha un consumo di circa il 29% più alto di quello riscontrato nell'aula 10.

Confronto tra i valori di CO2 nell'aula 10 e 11



Andamenti della CO2 relativa all'Hobo 3 (aula 10) e della CO2 relativa all'Hobo 13 (aula 11)

Sono state considerate per l'aula 10 la CO₂ relativa all'Hobo 3, per l'aula 11 la CO₂ relativa all'Hobo 13, entrambe poste rispettivamente nello stesso punto dell'aula. Si nota che gli andamenti sono qualitativamente simili, tuttavia, in alcune giornate, sono presenti livelli di CO₂ lievemente più alti nell'aula 11. La differenza non è sostanziale e spiegabile con le diverse attività svolte dagli occupanti.

Analisi dei dati con metodi basati sulla frequenza di occorrenza dei campioni

Si sono finora analizzati i dati nel dominio del tempo. Questo tipo di analisi consente di valutare le conseguenze sulle variabili misurate dovute agli input del sistema in base a un modello concettuale del sistema. Questo studio non consente però di analizzare quantità di dati estremamente alte come quelle prodotte da un sistema di monitoraggio ambientale. Per questo motivo si è costretti a ridurre gli intervalli di studio a periodi non troppo lunghi, nel nostro caso, ad esempio, ci si è limitati ad una settimana scelta in modo opportuno all'interno del periodo di osservazione. Inoltre la valutazione dei risultati si limita ad essere di tipo qualitativo e quindi poco utile per fare confronti tra soluzioni diverse. Ad esempio chiedersi per quale percentuale di tempo la concentrazione di CO₂ ha superato i limiti di qualità auspicabili, è molto difficile da percepire o misurare direttamente sui grafici nel dominio del tempo. Informazioni di questo tipo possono essere estratte molto più facilmente da una curva di distribuzione delle occorrenze dei campioni e dalla relativa curva cumulativa.

Per trovare la densità di occorrenza delle concentrazioni di CO₂ ci si è serviti di una procedura automatica di analisi di dati utilizzando del codice Python:

```
[2]: import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from scipy import stats
from scipy.stats import lognorm

[3]: data = pd.read_csv("mod.csv")
data
```

	date	temperature_3_media_no_riempimento	RH_3_media_no_riempimento	CO2_3_media_no_riempimento	Unnamed: 4	HOBO 3\ntemperature_3_media_riempimento	HOBO 3\ntRH3_media_riempimento	HOBO 3\ntCO2_3_media_riempimento	temperature_3_max_no_riempimento	RH_3_max_no_riempimento	...
0	08/05/2024 0:00	20.77	59.38	507.0	0.00	21.06	59.35	509.0	NaN	NaN	...
1	08/05/2024 0:01	20.77	59.33	501.0	0.01	21.06	59.3	503.0	NaN	NaN	...
2	08/05/2024 0:02	20.79	59.33	521.0	0.02	21.08	59.38	543.0	NaN	NaN	...
3	08/05/2024 0:03	20.77	59.33	518.0	0.03	21.06	59.35	539.0	NaN	NaN	...
4	08/05/2024 0:04	20.75	59.33	527.0	0.04	21.06	59.35	542.0	NaN	NaN	...
...
11635	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	...
11636	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	...
11637	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	...
11638	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	...
11639	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	...

11640 rows x 123 columns

```
[4]: dataset = data[['date', 'HOBO 3\ntCO2_3_media_riempimento', 'Agara Presenza traslata']]
dataset[dataset['Agara Presenza traslata'] == 1]

[5]: dataset
```

	date	HOBO 3\ntCO2_3_media_riempimento	Agara Presenza traslata
499	08/05/2024 8:19	456.0	1.0
500	08/05/2024 8:20	472.0	1.0
501	08/05/2024 8:21	459.0	1.0
502	08/05/2024 8:22	542.0	1.0
503	08/05/2024 8:23	581.0	1.0
...
11107	15/05/2024 17:07	444.0	1.0
11108	15/05/2024 17:08	473.0	1.0
11109	15/05/2024 17:09	463.0	1.0
11110	15/05/2024 17:10	478.0	1.0
11111	15/05/2024 17:11	473.0	1.0

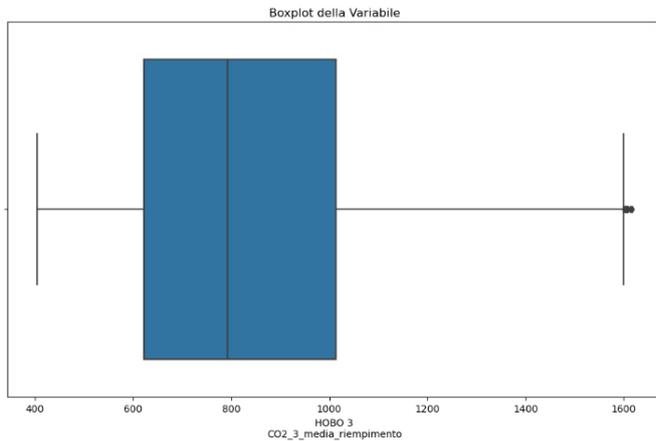
2593 rows x 3 columns

```
[7]: statistiche = dataset['HOBO 3\ncO2_3_media_riempimento'].describe()
statistiche

[7]: count    2593.000000
mean      827.429518
std       252.117665
min       485.000000
25%       623.000000
50%       793.000000
75%       1014.000000
max       1616.000000
Name: HOBO 3\ncO2_3_media_riempimento, dtype: float64

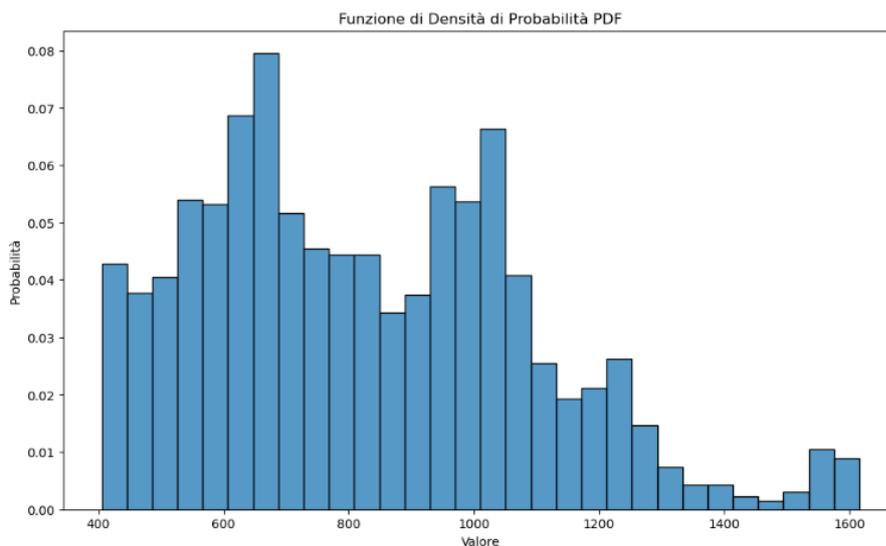
[8]: # Il box plot è il principale grafico per rappresentare la distribuzione dei dati ed evidenziare eventuali valori anomali. La scatola blu (box) è compresa tra il primo e il terzo quartile
# La linea in mezzo al box blu è il secondo quartile, cioè la mediana (N.B. NON MEDIA). Il baffo di destra è primo quartile - 1.5 * il range interquartile (La differenza tra terzo e primo quartile). Il baffo di sinistra è terzo quartile + 1.5 * il range interquartile
# I pallini al di fuori dei baffi sono considerati valori anomali fuori scala (in inglese outliers)
# Già da qui puoi vedere che la distribuzione è asimmetrica a sinistra (Left skewness)
# I percentili stanno nel box di sopra (25% = primo quartile, 50% = secondo quartile ecc.)

plt.figure(figsize=(12, 7))
sns.boxplot(x=dataset['HOBO 3\ncO2_3_media_riempimento'])
plt.title('Boxplot della Variabile')
plt.show()
```



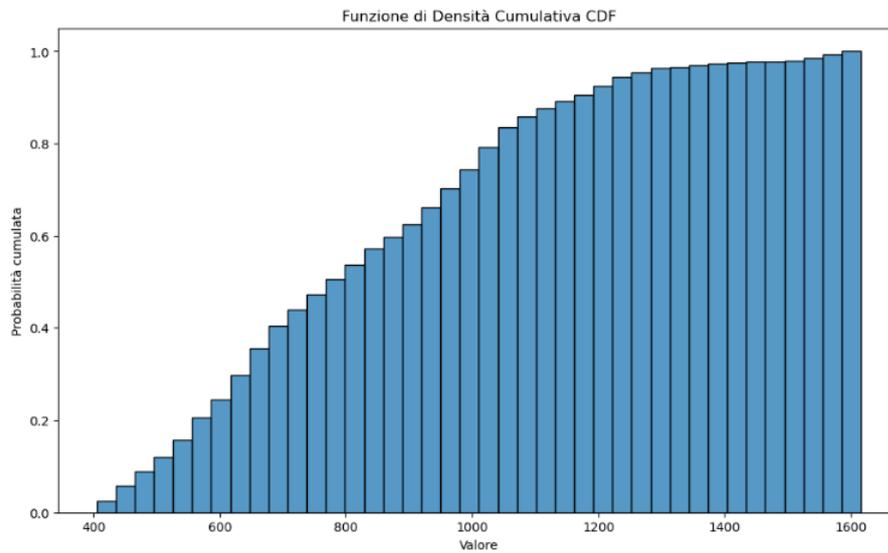
```
[9]: # Funzione di densità di probabilità
# Il valore sulle ordinate indica la probabilità che il valore della variabile X sia all'interno di un determinato intervallo

plt.figure(figsize=(12, 7))
sns.histplot(dataset['HOBO 3\ncO2_3_media_riempimento'], bins=30, kde=False, stat='probability')
plt.title('Funzione di Densità di Probabilità PDF')
plt.xlabel('Valore')
plt.ylabel('Probabilità')
plt.show()
```



```
[11]: # Funzione di densità di probabilità cumulativa
# Il valore sulle ordinate indica la probabilità che il valore della variabile X sia minore di una determinata soglia

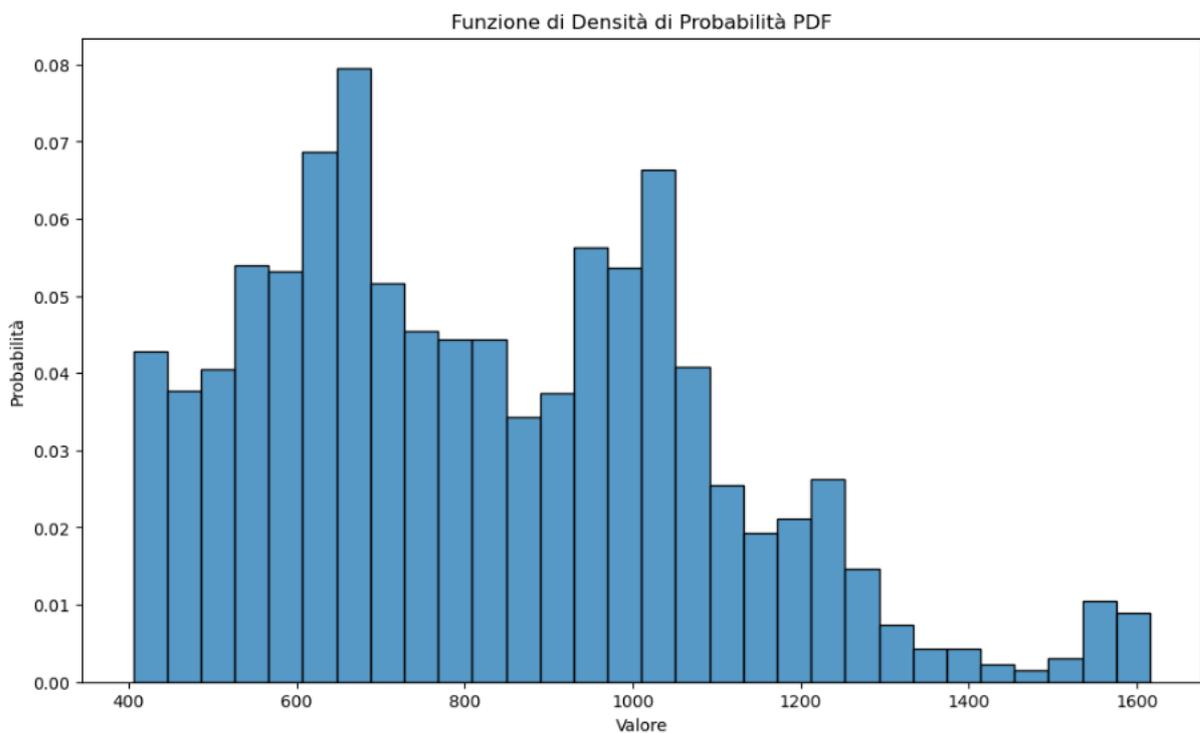
plt.figure(figsize=(12, 7))
sns.histplot(dataset['HOBO 3\ncO2_3_media_riempimento'], cumulative=True, bins=40, kde=False, stat='probability')
plt.title('Funzione di Densità Cumulativa CDF')
plt.xlabel('Valore')
plt.ylabel('Probabilità cumulata')
plt.show()
```



```
[12]: soglia = 1200 # Modifica questa soglia come vuoi
dati_ordinati = np.sort(dataset['HOB0 3\ncO2_3_media_riempimento'])
cdf = np.arange(1, len(dati_ordinati) + 1) / len(dati_ordinati)
probabilita = np.mean(dati_ordinati < soglia)
index = np.searchsorted(dati_ordinati, soglia)
probabilita_cdf = cdf[index] if index < len(cdf) else 1.0
print(f'La probabilità empirica che X sia minore di {soglia} è il {round(probabilita_cdf * 100, 1)} %')
```

La probabilità empirica che X sia minore di 1200 è il 90.9 %

Analisi delle curve di densità di occorrenza delle concentrazioni di co2

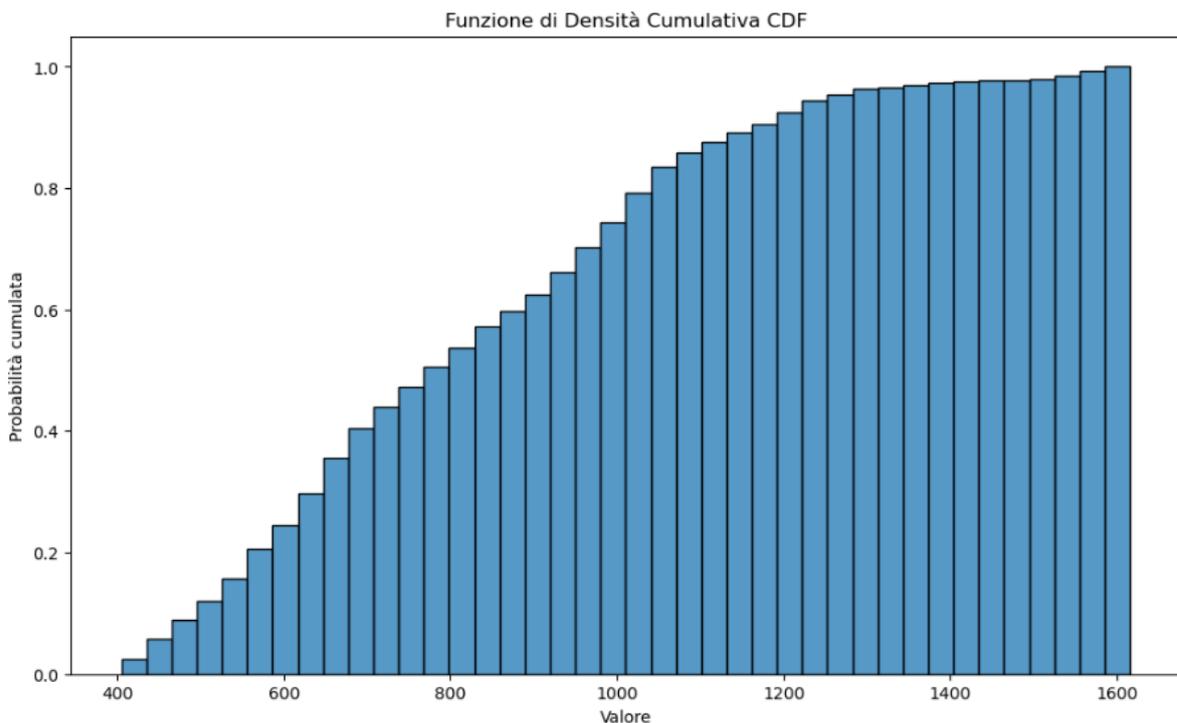


Lo studio è stato effettuato sui campioni della settimana dall'8 al 15 maggio 2024 considerando solo i periodi in cui l'aula è occupata, in modo da escludere ad esempio i valori notturni.

Quello rappresentato nella figura qua sopra è la funzione **densità di probabilità** che un campione della distribuzione della CO₂ ricada all'interno di un intervallo di circa 40 ppm. Ad esempio, la probabilità (o percentuale di tempo) che la CO₂ ricada nell'intervallo compreso tra i valori 1000 ppm e 1040 ppm, vale 6,5 %.

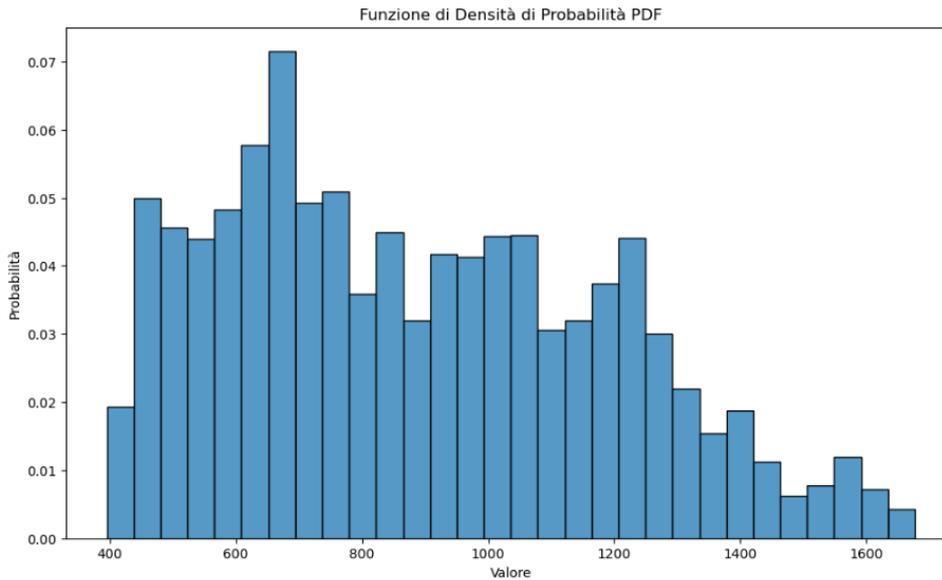
La distribuzione è piuttosto difficile da modellare con una distribuzione notevole probabilmente a causa del fatto che il periodo di osservazione è piuttosto breve. Di qualche rilievo può essere l'informazione che i valori più probabili di concentrazione della CO₂ sono intorno ai 650 ppm e 1000 ppm.

Integrando la funzione di densità di probabilità otteniamo la **funzione di densità cumulativa** che consente di leggere agevolmente informazioni di rilievo. Il grafico ci consente di leggere direttamente qual'è la percentuale di tempo nella quale la concentrazione di CO₂ è rimasta sotto i 1200 ppm che risulta essere di 90,9 % che può essere anche letto nel senso che la percentuale di tempo in cui la concentrazione di CO₂ ha superato i 1200 ppm è del 9,1% (ovvero il suo complemento).

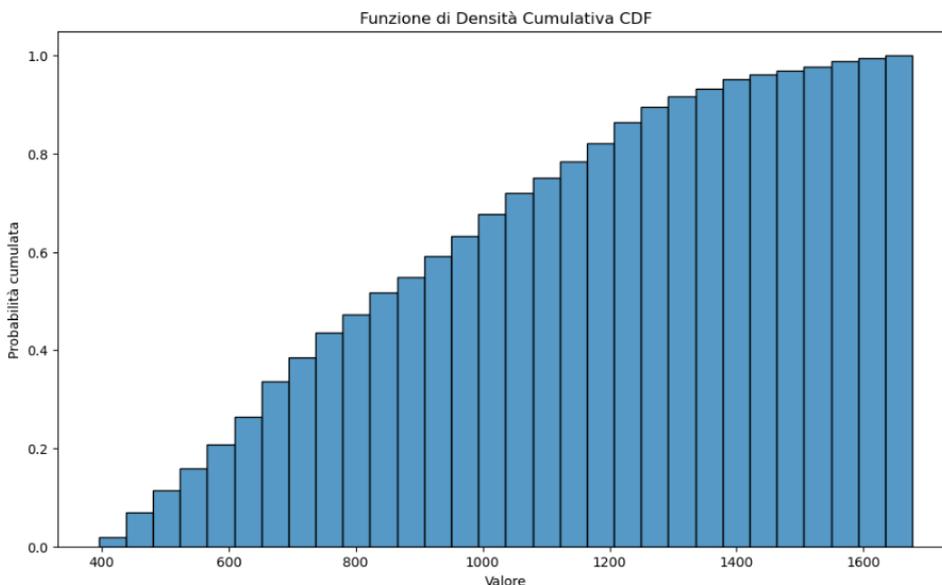


Effetti dell'ampliamento del periodo di osservazione

Considerato che questo strumento di analisi ci consente di analizzare più facilmente periodi più ampi, si è trovata la funzione di densità di occorrenza e la sua cumulativa per un periodo di osservazione più lungo, dal 2 aprile 2024 al 23 maggio 2024. Come si vede nel grafico sottostante la distribuzione è più regolare rispetto a quella fatta su un periodo di osservazione di una sola settimana.



Con questo metodo si può determinare la % di tempo in cui l'inquinante è rimasto sotto la soglia di 1200 ppm su un periodo molto ampio. Dalla lettura diretta del grafico della cumulativa si trova che la concentrazione di CO₂ è rimasta sotto il valore di 1200 ppm per l'81,6 %.



Metodo per valutare l'influenza di un determinato fattore sull'efficacia della ventilazione

Si vuole ora introdurre un metodo per valutare la correlazione esistente, misurata empiricamente, tra un fattore che influenza l'efficacia della ventilazione e la concentrazione di CO₂ presa come indice della stessa. Si studierà la correlazione esistente tra la concentrazione di CO₂ e l'apertura della porta, questo studio è stato già fatto intuitivamente nel dominio del tempo ma non ha portato a conclusioni certe per la difficoltà a valutare il comportamento in termini quantitativi e su grandi estensioni temporali il comportamento di una variabile rispetto all'altra.

Si applica nel seguito un metodo di analisi basato sulla teoria della probabilità che consente di dare una risposta a quesiti di questo tipo, ovvero valutare la correlazione tra uno dei fattori che influenzano una variabile ed il suo comportamento. Si utilizzerà il concetto di probabilità condizionata che consente di valutare che un evento A sia influenzato da un evento B:

$$P(A|B) = P_B(A) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

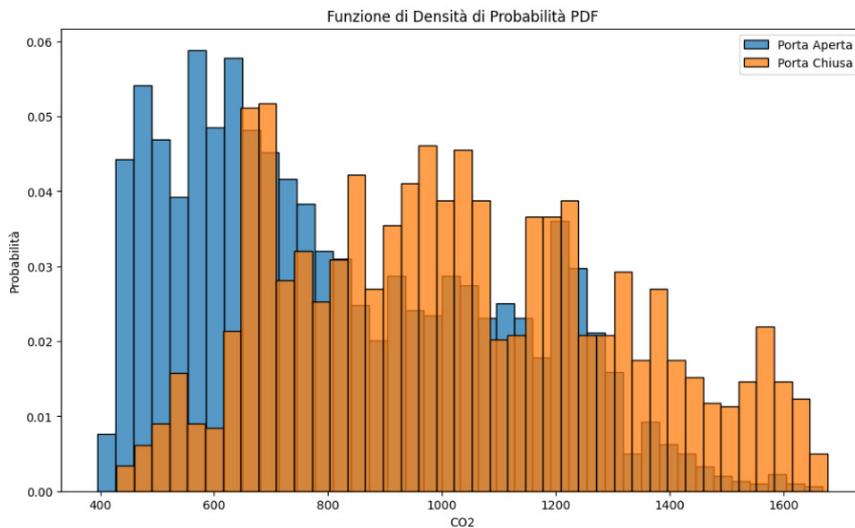
Dove al numeratore compare la probabilità congiunta degli eventi A e B, mentre al denominatore è presente la probabilità del verificarsi dell'evento B. Nel caso in esame si valuterà ad esempio la probabilità che la concentrazione di CO₂ stia sotto una soglia prefissata quando la porta è aperta in rapporto alla probabilità che stia sotto soglia, misurata senza la condizione di porta aperta.

```

* [6]: # Funzione di densità di probabilità
# Il valore sulle ordinate indica la probabilità che il valore della variabile X sia all'interno di un determinato intervallo

plt.figure(figsize=(12, 7))
sns.histplot(co2_porta_aperta, bins=40, kde=False, stat='probability')
sns.histplot(co2_porta_chiusa, bins=40, kde=False, stat='probability')
plt.title('Funzione di Densità di Probabilità PDF')
plt.xlabel('CO2')
plt.ylabel('Probabilità')
plt.legend(["Porta Aperta", "Porta Chiusa"])
plt.show()

```

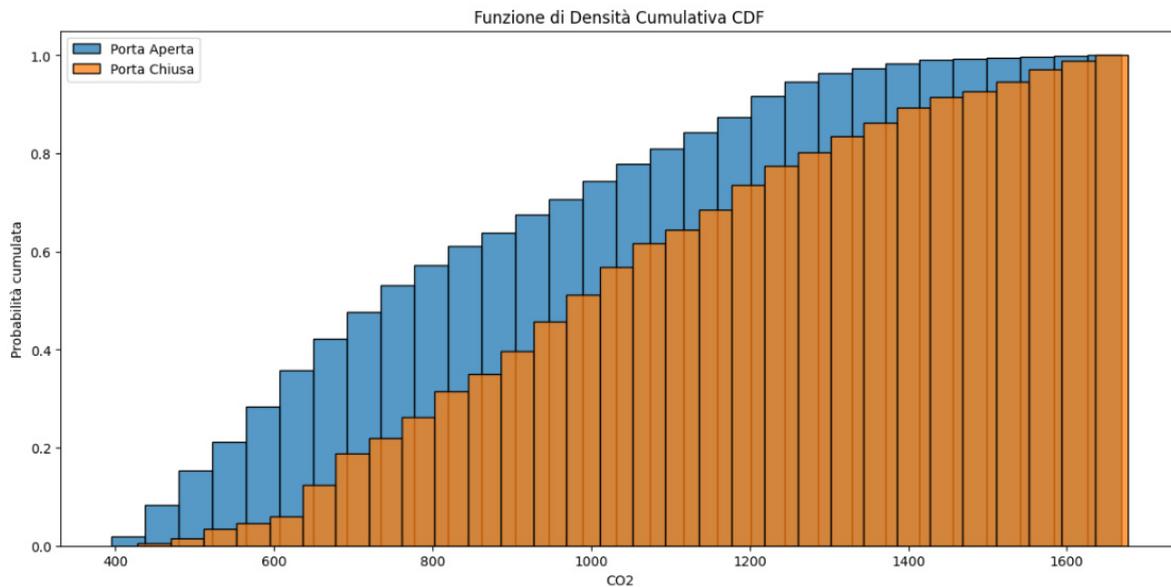


```

* [8]: # Funzione di densità di probabilità cumulativa
# Il valore sulle ordinate indica la probabilità che il valore della variabile X sia minore di una determinata soglia

plt.figure(figsize=(15, 7))
sns.histplot(co2_porta_aperta, cumulative=True, bins=30, kde=False, stat='probability')
sns.histplot(co2_porta_chiusa, cumulative=True, bins=30, kde=False, stat='probability')
plt.title('Funzione di Densità Cumulativa CDF')
plt.xlabel('CO2')
plt.ylabel('Probabilità cumulata')
plt.legend(["Porta Aperta", "Porta Chiusa"])
plt.show()

```



```
[13]: # Applicando la definizione di probabilità condizionata, che porta al teorema di Bayes
soglia = 800
condition = (dataset['porta'] == 0) & (dataset['presenza'] == 1)

# Calcolare P(A n B) e P(B)
P_A_and_B = dataset[condition & (dataset['co2'] < soglia)].shape[0] # Condizioni soddisfatte di porta chiusa, persone presenti con CO2 sotto soglia
P_B = dataset[condition].shape[0] # Condizioni soddisfatte totali di porta chiusa e persone presenti

P_A_dato_B = P_A_and_B / P_B # Probabilità condizionata
print(f"La probabilità che la CO2 sia minore della soglia quando ci sono persone dentro e la porta è chiusa è: {P_A_dato_B*100:.1f} %")
La probabilità che la CO2 sia minore della soglia quando ci sono persone dentro e la porta è chiusa è: 25.8 %

[14]: # Applicando la definizione di probabilità condizionata, che porta al teorema di Bayes
soglia = 800
condition = (dataset['porta'] == 1) & (dataset['presenza'] == 1)

# Calcolare P(A n B) e P(B)
P_A_and_B = dataset[condition & (dataset['co2'] < soglia)].shape[0]
P_B = dataset[condition].shape[0]

P_A_dato_B = P_A_and_B / P_B
print(f"La probabilità che la CO2 sia minore della soglia quando ci sono persone dentro e la porta è aperta è: {P_A_dato_B*100:.1f} %")
La probabilità che la CO2 sia minore della soglia quando ci sono persone dentro e la porta è aperta è: 55.3 %

[9]: # Metodo "manuale" per fare la stessa cosa
soglia = 800
probabilità_condizionata = {}
for stato_porta in [0,1]:
    sotto_df = dataset[dataset['porta'] == stato_porta]
    probabilità = np.mean(sotto_df['co2'] < soglia)
    probabilità_condizionata[stato_porta] = probabilità

print(f"La probabilità che la CO2 sia inferiore a {soglia} è '{:.1f}'.format(probabilità_condizionata[0] * 100) % se la porta è chiusa, mentre è '{:.1f}'.format(probabilità_condizionata[1] * 100) % se la
La probabilità che la CO2 sia inferiore a 800 è 25.8 % se la porta è chiusa, mentre è 55.3 % se la porta è aperta
```

Si osserva che la densità di probabilità della CO₂ quando la porta è aperta rispetto a quella misurata a porta chiusa si addensano verso sinistra mostrando in questo modo che i livelli di CO₂ misurati nel campione in esame quando la porta è aperta sono più bassi. Dalla funzione di densità cumulativa è possibile misurare direttamente la probabilità che la CO₂ sia sotto una soglia fissata nel caso di porta aperta o porta chiusa. Fissando la soglia a 800 ppm si ottiene che, nel campione considerato, la CO₂ resta sotto soglia per il 25,8 % se la porta è chiusa, e per il 55,3 % se la porta è aperta. Fissando la soglia a 1200 ppm, si ottiene rispettivamente i valori di 71,1 % e 87,3%.

Questo tipo di studio consente quindi in questo caso di confermare quello che si era intuito nello studio nel dominio del tempo e dargli anche una valutazione quantitativa. Inoltre consente di eseguire lo studio su una mole di dati molto ampia.

I fattori che influenzano l'efficacia della ventilazione sono molteplici e può essere molto utile ripetere lo stesso studio rispetto a tutti i fattori considerati, anche per confrontarne numericamente l'impatto.

Conclusioni

In questa tesi è stato studiato il caso della ventilazione in due aule di un edificio scolastico esistente di tipologia abbastanza diffusa nel patrimonio italiano con l'obiettivo di indagare sulla qualità dell'aria ottenibile mediante un sistema di ventilazione ibrido. L'indagine si è svolta nei mesi di aprile e maggio 2024 nei quali si verificano le condizioni ideali per la ventilazione naturale e continuerà nei prossimi mesi per coprire tutte le condizioni climatiche che possono verificarsi nel corso di un anno consentendo di studiare più propriamente la ventilazione meccanica.

Lo studio di quantità di dati così ampie come quelle generate da un sistema di monitoraggio ambientale per periodi lunghi, richiede strumenti adeguati. E' necessario quindi automatizzare tutto il processo di raccolta, acquisizione, ricampionamento ed allineamento dei dati, con strumenti informatici adeguati. Nel seguente studio si è utilizzato con profitto del codice scritto nel linguaggio di programmazione Python. Sono inoltre necessari metodi di analisi adeguati che consentano lo studio nel dominio del tempo e a questo proposito si è utilizzato Excel per la rappresentazione grafica delle variabili acquisite, saturandone le capacità.

Al fine di poter estrarre agevolmente informazioni su periodi più ampi di quelli studiabili nel dominio del tempo, è stata introdotta un'analisi che fa uso della distribuzione di densità della occorrenza della concentrazione della CO₂ e la relativa funzione di densità cumulativa che consente di valutare come si distribuiscono le frequenze dei valori di CO₂. Dalla curva di densità cumulativa è inoltre possibile leggere direttamente la percentuale di tempo nella quale l'inquinante è rimasto sotto una soglia assegnata. Si è utilizzato inoltre un metodo che consente di valutare quanto uno dei fattori che incide sulla ventilazione contribuisca all'abbassamento della CO₂. La valutazione della probabilità condizionata ha consentito nel nostro studio di valutare l'impatto della apertura della porta sulla probabilità di controllare la CO₂ al di sotto di una soglia prefissata. Il metodo consente di estendere facilmente l'analisi a periodi di tempo molto lunghi e di estrarre informazioni che nel dominio del tempo risultano difficilmente riconoscibili.

Per quanto riguarda i risultati delle analisi sui dati raccolti si ricorda che per le due aule oggetto di studio è stata adottata una ventilazione ibrida. Il monitoraggio è stato effettuato in un periodo con clima omogeneo primaverile di aprile-maggio nel quale

prevale la ventilazione naturale. Dallo studio dei dati raccolti mediante il sistema di monitoraggio implementato si possono trarre le seguenti conclusioni:

- La ventilazione ha permesso di ottenere livelli di anidride carbonica buoni. Infatti si è trovato che la concentrazione di CO₂ è rimasta sotto la soglia di accettabilità per l'81,6% del tempo.
- I valori massimi osservati sono stati dell'ordine di 1800 ppm. Tali valori, che si osservano per periodi abbastanza brevi, si sono verificati quando la ventilazione naturale non ha potuto contare sulla apertura contemporanea della porta. Questo mette in evidenza il fatto che è necessario progettare adeguatamente la ventilazione naturale perchè questa risulti efficace e svolgere adeguatamente il suo ruolo in una ventilazione ibrida.
- Si è osservato che gli utenti hanno manifestato l'abitudine a fare scarsissimo ricorso all'apertura delle finestre, preferendo l'apertura dei vasistas. Probabilmente a causa delle correnti d'aria che si generano dall'apertura completa degli infissi che possono risultare fastidiose rispetto allo svolgimento delle attività. Il problema delle correnti d'aria associate alla ventilazione naturale, si presenta anche nella stagione temperata pur assumendo gravità molto inferiori rispetto a quella invernale. Il tipo di apertura degli infissi va studiato in maniera da limitare le correnti d'aria nella zona occupata.
- Considerato che il tipo di ventilazione che si è inteso utilizzare in questo studio è di tipo ibrido e che lo studio si è sviluppato nella stagione in cui si verificano le condizioni per l'impiego della ventilazione naturale, l'apporto della ventilazione meccanica è stato ovviamente limitato come è naturale che avvenga nella ventilazione ibrida. Infatti in presenza di ventilazione naturale i valori di CO₂ si abbassano a causa della contemporanea presenza della ventilazione naturale e pertanto la ventilazione meccanica viene contenuta. Inoltre l'efficienza della ventilazione meccanica nella stagione calda diminuisce molto in quanto l'aria immessa è più calda di quella interna e pertanto l'aria tende a stratificare e non raggiungere la zona occupata. Questo conferma l'opportunità di utilizzare una ventilazione di tipo ibrido che privilegi l'uso della ventilazione meccanica durante la stagione fredda e della ventilazione naturale durante la stagione temperata.

Bibliografia

- [1] U. Haverinen-Shaughnessy, D. J. Moschandreas, and R. J. Shaughnessy, 'Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement', *Indoor Air*, vol. 21, no. 2, pp. 121–131, Apr. 2011, doi: 10.1111/j.1600-0668.2010.00686.x.
- [2] European Environment Agency, 'Trends in atmospheric concentrations of CO2 (ppm)'.
[3] A. Persily and L. de Jonge, 'Carbon dioxide generation rates for building occupants', *Indoor Air*, vol. 27, no. 5, pp. 868–879, Sep. 2017, doi: 10.1111/ina.12383.
- [4] UNI, 'UNI EN 16798-1:2019 - Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente 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 - Modulo M1-6'.
- [5] UNI, 'UNI/PdR 122:2022 - "Monitoraggio della qualità dell'aria negli edifici scolastici - Strumenti, strategie di campionamento e interpretazione delle misure"'.
- [6] Ing. Gian Luca Guerrini, 'Ing. Gian Luca Guerrini. L'indoor air quality (iaq) nelle scuole. INGENIO, 2021'.
- [7] L. S. C. Tambani, ' "Classificazione della qualità dell'aria in ambienti scolastici tramite il monitoraggio di C=2 e particolato= AICARR Journal n. 67 ,Marzo-Aprile 2021.'
- [8] UNI, 'UNI EN 16798-3:2018 Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 3: Per gli edifici non residenziali - Requisiti prestazionali per i sistemi di ventilazione e di condizionamento degli ambienti (Moduli M5-1, M5-4)'.
- [9] Per Heiselberg, 'Principles of Hybrid Ventilation, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2002. '.
- [10] J. K. R. L. O. S. Steiger, 'Hybrid ventilation - the ventilation concept in the future school buildings, AIVC Conference Paper, 2012. '.
- [11] UNI, 'UNI 10339:1995 - Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura'.

Appendice

Specifiche tecniche degli strumenti di misura e registrazione dei dati

Aranet4 HOME

Wireless, portable device for measuring air quality. Measures carbon dioxide (CO₂) concentration, temperature, relative humidity, and atmospheric pressure. This sensor, belonging to the HOME sensor series, is intended to be used together with the *Aranet Home* mobile application for extended data browsing capabilities.



Product numbers

Globally	TDSPC0H3
----------	----------

Sensor performance

General notes

- 95 % of the sensors perform within the specified accuracy limits at the time of purchase, assuming they are in an equilibrium state. For evaluation of the total measurement error, long-term drift has to be taken into account.
- Measurement time constant τ is determined at 1 m/s airflow. This constant refers to the time it takes for the sensor reading to reach 63 % of a new steady-state value in response to a step change in the environment. It essentially represents the speed at which the sensor adjusts to changes in the measured quantity.

CO₂ concentration

Range	0–9999 ppm
Resolution	1 ppm
Accuracy	$\pm(30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ of reading})$
Long term drift	Not available
Time constant τ	100 s

- CO₂ sensor of the device is calibrated at standard atmospheric pressure. CO₂ readings are pressure compensated and comply with the specifications down to 750 hPa. If the device has to be used at high altitude for a prolonged period of time, manual calibration of the unit should be performed for optimal performance. It is not intended to use the device higher than 4000 m (13'000 ft) above the sea level.
- CO₂ measurement accuracy is provided for a range 0–5000 ppm, temperature 15–35 °C (59–95 °F) and relative humidity 0–80 %. Accuracy above 5000 ppm is 10 % of reading, but not guaranteed since it is extrapolated from the calibrated range.

- If a drift of the CO₂ measurements occurs, calibration feature of the device should be used. Auto calibration mode is utilizing ABC algorithm whereas manual calibration mode demands sensor to be exposed to fresh air.

Temperature

Range	0–50 °C	32–122 °F
Resolution	0.1 °C	0.1 °F
Accuracy	±0.3 °C	±0.5 °F
Long term drift	0.03 °C/year	0.05 °F/year
Time constant τ	10 min	

Relative humidity

Range	0–85 %
Resolution	1 %
Accuracy	±3 %
Long term drift	0.5 %/year
Time constant τ	To be defined

Atmospheric pressure

Range	600–1100 hPa
Resolution	1 hPa
Accuracy	+3 hPa / -2 hPa
Long term drift	1 hPa/year
Time constant τ	0 s (instantaneous)

- Device measures absolute pressure, i.e., readings are not compensated for an elevation above the sea level.

General specifications

Ingress protection rating	IP20	
Operating temperature range	0–50 °C	32–122 °F
Operating relative humidity range	0–85 %	
Dimensions	71×71×24 mm	2.80×2.80×0.94 in
Weight (incl. batteries)	104 g	3.7 oz
Enclosure material	Polycarbonate	
Power supply	2 pcs AA batteries	
Packaging includes	2 pcs AA alkaline batteries, configuration pin	

Bluetooth parameters

Line of sight range	10 m	33 ft
Transmitter power	4 dBm or -12 dBm	
Data transmission interval	1, 2, 5 or 10 min	

Battery lifetime

Measurement interval	Alkaline batteries		Lithium batteries	
	Bluetooth Off	Bluetooth On	Bluetooth Off	Bluetooth On
1 min	1.4 years	1.0 years	1.8 years	1.2 years
2 min	2.6 years	1.4 years	3.4 years	1.9 years
5 min	5.1 years	2.1 years	7.2 years	2.7 years
10 min	7.8 years	2.3 years	>10 years	3.1 years

- Data provided for a device with an active Bluetooth connection considers it being paired with the *Aranet Home* mobile application and engaging in regular data transfer with the mobile phone or tablet.
- Battery lifetime data has been obtained by mathematical extrapolation and is provided for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.
- Battery lifetime tests and calculations performed assuming device is at 20 °C (68 °F) and using *Fujitsu Premium LR6G07* (alkaline) and *Energizer Ultimate Lithium L91* (lithium) AA batteries as reference.
- The operating temperature range may vary based on the battery type used. Generally, the range for alkaline batteries is between -20–50 °C (-4–122 °F), whereas for lithium batteries, it is -40–60 °C (-40–140 °F).

Measurement data memory specifications

Measurement interval	Historic data availability
1 min	3.5 days
2 min	7 days
5 min	15 days
10 min	30 days

- The device provides access to historical data through the *Aranet Home* mobile application. For users seeking high-resolution measurement data consistently, shorter measurement interval is recommended, as frequent interval changes can impact historical data resolution.
- When transitioning to a longer measurement interval (e.g., from 1 min to 10 min), the firmware computes average values from subsets to represent the longer sampling (for instance, a 10 min average derived from ten 1 min samples).
- Likewise, when shifting to a shorter interval (e.g., from 10 min to 1 min), the memory stores additional samples mirroring the longer interval's data (such as ten 1 min samples with identical values as the original 10 min sample).

- The provided information applies to a device with the latest firmware installed. We strongly advise upgrading the firmware using the *Aranet Home* mobile application as soon as an update becomes available.

Important notes

- Device is qualified to work properly within ambient clean air. Qualification for use in harsh environment is the duty of the user of the sensor. Exposure to volatile organic compounds, acids or bases, etching substances such as H_2O_2 , NH_3 , shall be avoided.
- Do not leave the device in direct sunlight! Exposure to intense sunlight can adversely affect the performance and longevity of the e-ink display, potentially leading to issues like reduced contrast, diminished readability, or even permanent damage to the display pixels or electronic components. Moreover, sun exposure can also adversely impact accuracy of sensor readings.

Compliance information

CE Conformité Européenne

FC Federal Communications Commission (USA)

IC Innovation, Science and Economic Development Canada



The HOBO MX CO₂ data logger records carbon dioxide, temperature, and relative humidity (RH) data in indoor environments using non-dispersive infrared (NDIR) self-calibrating CO₂ sensor technology and integrated temperature and RH sensors. This Bluetooth® Low Energy (BLE)-enabled logger is designed for wireless communication and supports a USB connection. Using the HOBObconnect® app on your phone, tablet, or computer, or HOBOWare® software on your computer, you can easily configure the logger, download data from it, and view plotted data. The logger can calculate minimum, maximum, average, and standard deviation statistics and can be configured to trip audible or visual alarms at specified thresholds. In addition, it supports burst logging in which data is logged at a different interval when sensor readings are above or below certain limits. This logger also has a built-in LCD screen to display the current CO₂ level, temperature, RH, logging status, battery use, memory consumption, and more.

HOBO MX CO₂ Logger

MX1102A

Included Items:

- Four AA 1.5 V alkaline batteries

Required Items:

- Mobile device with HOBObconnect app, Bluetooth, OS, iPadOS®, or Android™, or a Windows computer with a native BLE adapter or supported BLE dongle

OR

- HOBOWare 3.7.3 or later and USB cable

Accessories:

- Mounting kit with mounting brackets, screws, tie wraps, and Command™ strip

Specifications

Temperature Sensor

Range	0° to 50°C (32° to 122°F)
Accuracy	±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32° to 122°F), see Plot A
Resolution	0.024°C at 25°C (0.04°F at 77°F), see Plot A
Drift	<0.1°C (0.18°F) per year

RH Sensor*

Range	1% to 90% RH (non-condensing)
Accuracy	±2% from 20% to 80% typical to a maximum of ±4.5% including hysteresis at 25°C (77°F); below 20% and above 80% ±6% typical
Resolution	0.01%
Drift	<1% per year typical

CO₂ Sensor

Range	0 to 5,000 ppm
Accuracy	±50 ppm ±5% of reading at 25°C (77°F), less than 90% RH (non-condensing) and 1,013 mbar
Warm-up Time	15 seconds
Calibration	Auto or manual to 400 ppm
Non-linearity	<1% of FS
Pressure Dependence	0.13% of reading per mm Hg (corrected via user input for elevation/altitude)
Operating Pressure Range	950 to 1,050 mbar (use Altitude Compensation for outside of this range)
Compensated Pressure Range	-305 to 5,486 m (-1,000 to 18,000 ft)
Sensing Method	Non-dispersive infrared (NDIR) absorption

Response Time

Temperature	12 minutes to 90% in airflow of 1 m/s (2.2 mph)
RH	1 minute to 90% in airflow of 1 m/s (2.2 mph)
CO ₂	1 minute to 90% in airflow of 1 m/s (2.2 mph)

Logger

Radio Power	1 mW (0 dBm)
Transmission Range	Approximately 30.5 m (100 ft) line-of-sight
Wireless Data Standard	Bluetooth Low Energy (Bluetooth Smart)
Logger Operating Range	0° to 50°C (32° to 122°F); 0 to 95% RH (non-condensing)

*Per RH sensor manufacturer data sheet

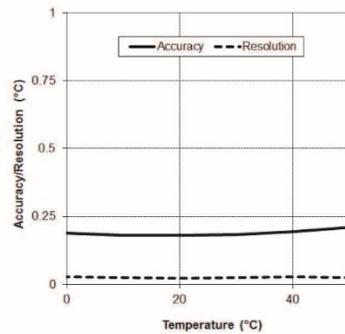
Note: The HOBO U-Shuttle (U-DT-1) is not compatible with this logger.

Specifications (continued)

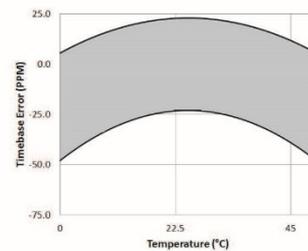
Logging Rate	1 second to 18 hours
Logging Modes	Fixed interval (normal, statistics) or burst
Memory Modes	Wrap when full or stop when full
Start Modes	Now, next interval, push button, date & time
Stop Modes	When memory full, push button, date & time, or after a set logging period
Time Accuracy	±1 minute per month at 25°C (77°F), see Plot B
Power Source	4 AA 1.5 Volt batteries (user replaceable) or USB power source (5 V DC, 2 Watts)
Battery Life	6 months, typical with logging and sampling intervals of 5 minutes or slower; 6 months or less with logging and sampling intervals faster than 5 minutes while logging CO ₂ . Entering burst logging mode will impact battery life. With app use, battery life can be reduced by remaining connected, excessive readouts, audible alarms, and paging. Visual/audible alarms and other events can have a marginal impact on battery life.
Memory	128 KB (84,650 measurements, maximum)
Download Type	USB 2.0 interface or via Bluetooth Smart
Full Memory Download Time	20 seconds via USB; approximately 60 seconds via Bluetooth Smart, may take longer the further the device is from the logger
LCD	LCD is visible from 0° to 50°C (32° to 122°F); the LCD may react slowly or go blank in temperatures outside this range
Size	7.62 x 12.95 x 4.78 cm (3.0 x 5.1 x 1.88 inches)
Weight	267.4 g (9.43 oz)
Environmental Rating	IP50
CE	The CE Marking identifies this product as complying with all relevant directives in the European Union (EU).
FC	See last page

*Per RH sensor manufacturer data sheet

Note: The HOBO U-Shuttle (U-DT-1) is not compatible with this logger.



Plot A: Temperature Accuracy and Resolution



Plot B: Time Accuracy

Specifications

Model

AAQS-S01

Color

White

Product Dimensions

41.6 × 76.0 × 14 mm (1.64*2.99*0.55 in)

Battery

CR2450 × 2

Wireless Protocols

Zigbee 3.0 IEEE 802.15.4

Operating Temperature

0°C~+50°C (32°F~122°F)

Operating Humidity

0~95% RH, no condensation

TVOC Detection Range0~25 mg/m³**TVOC Resolution**1ppb or 0.01mg/m³**Temperature Detection Range**

-20~60°C (-4~140°F)

Temperature Resolution

0.1°C

Humidity Detection Range

0~100%RH

Humidity Resolution

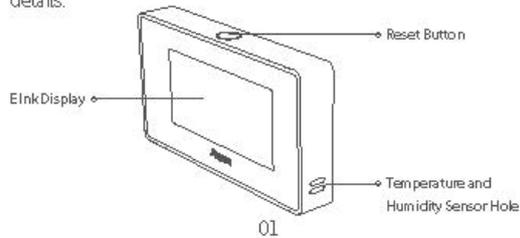
1%

Product Introduction

The Aqara TVOC Air Quality Monitor can detect the concentration and level of TVOC in the air, as well as temperature and humidity. After it is bound with a hub, it can use TVOC concentration or level, temperature, and humidity changes as conditions of automation, work with other smart home devices to implement various smart scenarios, and send notifications to your mobile phone.

* TVOC: Total Volatile Organic Compounds, organic compounds whose saturated vapor pressure exceeds 133.32 Pa at room temperature. Its boiling point is between 50°C and 250°C. It can evaporate in the air at room temperature. Its toxicity, irritation, carcinogenicity and smell will affect the skin and mucous membranes and cause acute damage to the human body.

* An Aqara Zigbee 3.0 Hub is required. Some functions require specific models of hubs. See www.aqara.com/support for more details.



Specifications

Model: AAQS-S01

Dimensions: 41.6 × 76.0 × 14 mm (1.64 × 2.99 × 0.55 inch)

Wireless Protocol: Zigbee 3.0

Battery Model: CR2450 × 2

Operating Temperature: 0 °C ~ +50 °C

Operating Humidity: 0~95% RH, no condensation

TVOC Detection Range: 0~25mg/m³

Temperature Detection Range: 0 ~ 50 °C

Humidity Detection Range: 0 ~ 100% RH

Zigbee Operation Frequency: 2405-2480 MHz

Zigbee Maximum Output Power ≤ 13 dBm

Warnings

1. This product is not a toy, please keep children away from this product.
2. This product is designed for indoor use only.
3. Do not place this product near a heat source.
4. Do not attempt to repair the product by yourself. All repairs should be performed by authorized personnel.

05



USER GUIDE

USER GUIDE

WI-FI DOOR/WINDOW SENSOR

Shelly Door/Window by Allterco Robotics is intended to be placed on a door or window in order to be aware of any open/close, incline of opening, LUX sensor and vibration alert*. Shelly Door/Window is battery powered, with battery life up to 2 years. Shelly may work as a standalone device or as an accessory to a home automation controller.

* Some of the features will be available after a FW update of the device.

Specification

Power Supply

2x 3V CR123A Batteries

Battery life

2 years

Complies with EU standards

- RE Directive 2014/53/EU
- LVD 2014/35/EU
- EMC 2004/108/WE
- RoHS2 2011/65/UE

Working temperature

-10 ÷ 50 °C

Temperature meas. range:

-10 °C ÷ 50 °C (± 1 °C)

Radio signal power: 1mW

Radio protocol

WiFi 802.11 b/g/n

Frequency

2400 – 2500 MHz

Operational range (depending on local construction):

- up to 50 m outdoors
- up to 30 m indoors

Dimensions

- Sensor 82x23x20mm
- Magnet 52x16x13mm

Electrical consumption

- Static current: ≤10 µA
- Alarm current: ≤60 mA

NETATMO INTERNA ED ESTERNA

Specifiche tecniche

Dimensioni

- Modulo Interno 45x45x155 mm
 - Modulo esterno 45x45x105 mm
-

Compatibilità dell'applicazione

- Compatibilità con iPhone e iPad:
 - Per utilizzare questo accessorio compatibile con HomeKit, si raccomanda la versione più recente di iOS o iPadOS.
 - Compatibilità con Android:
 - Si raccomanda una versione recente di Android con accesso a Play Store.
-

Requisiti di sistema

- Accesso a Internet a banda larga senza fili. I punti di accesso pubblici (hotspot) non sono supportati.
-

Materiali e design

- Monoblocco in alluminio
 - Modulo interno esclusivamente per uso interno
 - Modulo esterno per uso esterno
-

Impostazioni di connessione

- Tra il Relè e il router di internet Wi-Fi 802.11 b/g/n (2,4 GHz)
 - Connessione wireless (radio) tra i moduli Radio a lungo raggio (868 MHz)
 - Sicurezza
 - Aperto/WEP/WPA/WPA2-personale (TKIP e AES)
-

Sensori e misurazioni

- Frequenza di lettura ogni 5 minuti
- Unità °C
- Temperatura (interna):

- Intervallo di misurazione da 0°C a 50°C
- Precisione $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$
- Temperatura (esterna):
- Intervallo di misurazione da -40°C a 65°C
- Precisione $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$
- Umidità (interna ed esterna):
- Intervallo di misurazione Da 0 a 100%
- Precisione $\pm 3\%$
- Barometro:
- Intervallo di misurazione da 260 a 1160 mbar
- Precisione ± 1 mbar
- Misuratore di CO₂ (interno):
- Intervallo di misurazione Da 0 a 5 000 ppm
- Fonometro:
- Intervallo di misurazione Da 35 dB a 120 dB

Alimentazione e batterie

- Modulo interno alimentato da un alimentatore a muro USB
- Modulo esterno alimentato da 2 batterie AAA (autonomia fino a 2 anni)

Contenuto della confezione

- 1 modulo interno
- 1 modulo esterno
- 1 adattatore Micro USB
- 1 kit di montaggio a parete per il modulo esterno
- 2 pile AAA incluse