



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

**Ventilazione meccanica controllata nelle scuole della Regione Marche:
archetipi e mappatura spaziale del comfort multi-dominio**

**Controlled mechanical ventilation in schools in the Marche Region:
archetypes and spatial mapping of multi-domain comfort**

Relatore: Chiar.ma

Prof.ssa **Francesca Stazi**

Tesi di Laurea di:

Margherita Cippitelli

Correlatori:

Ph.D. **Serena Summa**

Prof. **Costanzo Di Perna**

A.A. 2023/ 2024

INDICE

Abstract	2
1. Introduzione	3
2 Stato dell'arte e problematiche irrisolte	7
2.1 Caratterizzazione tipologica delle costruzioni scolastiche	7
2.2 IEQ nelle aule scolastiche	7
2.3 Obiettivi.....	9
3 Metodo	10
3.1 Analisi tipologica.....	10
3.2 Analisi fattore medio di luce diurna	17
3.3 Analisi sperimentale su due casi studio a confronto.....	20
3.3.1 Generalità dei due casi studio	20
3.3.2 Analisi sul medio periodo	30
3.3.3 Analisi comportamento utente	35
3.3.4 Analisi microclimatica	40
3.3.5 Analisi del comfort	50
4 Risultati	54
4.1 Analisi tipologica.....	54
4.2 Analisi fattore medio di luce diurna	60
4.3 Analisi sperimentale su due casi studio a confronto.....	62
4.3.1 Analisi sul medio periodo	62
4.3.2 Analisi comportamento utente	78
4.3.3 Analisi microclimatica	98
4.3.4 Analisi del comfort	128
5 Discussione	136
6 Conclusione.....	144
Bibliografia	147

Abstract

Lo studio effettuato in questa tesi riguarda la caratterizzazione geometrica, impiantistica, termofisica e di qualità dell'aria di aule scolastiche dotate di ventilazione meccanica controllata della Regione Marche. Il lavoro è stato sviluppato in due fasi: la prima ha permesso di identificare gli archetipi delle aule, mentre la seconda, grazie ad un'analisi comparativa sperimentale ha permesso di individuare in maniera tridimensionale il comfort termico su due aule e la qualità dell'aria in funzione alle diverse macchine di ventilazione. L'analisi tipologica ha identificato quattro diversi tipi di sistemi di ventilazione meccanica: impianto delocalizzato con unità di ventilazione interna alle aule, impianto delocalizzato con unità e canali interni all'aula, impianto delocalizzato con unità esterne all'aula ed impianto centralizzato. Sono stati definiti anche tre diversi archetipi di aule: ampie, quadrate e profonde, con percentuali di superficie finestrata rispettivamente del 40%, 30% e 40%. La seconda fase di lavoro ha permesso di selezionare due aule, una nella scuola di Falconara e una nella scuola di Recanati, caratterizzate da dimensioni e numero di occupanti simili ma differenti tipologie di ventilazione meccanica: una con impianto delocalizzato con unità di ventilazione interna alle aule e l'altra con impianto delocalizzato con unità e canali interni all'aula. Dal confronto tra le due è emerso che l'aula di Recanati con impianto di ventilazione con unità e canali interni all'aula, risulta essere la miglior soluzione capace di garantire una maggiore efficienza dell'impianto e una miglior distribuzione dell'aria immessa. Inoltre, dal punto di vista del comfort, favorisce una condizione più vicina al benessere dell'utente con una percentuale di insoddisfatti molto bassa e livelli di CO₂ adeguati all'ambiente scolastico.

1. Introduzione

L'oggetto di questo elaborato di tesi rientra all'interno del progetto VITALITY "WP2. People-centric sustainable buildings" finanziato dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza al quale ha aderito anche l'Università Politecnica delle Marche. Il progetto ha come obiettivo principale lo sviluppo di prodotti innovativi per l'edilizia scolastica, incentrati sul comfort delle persone e al tempo stesso interattivi multifunzionali. Nello specifico, questi prodotti saranno in grado di integrare diverse funzionalità come ad esempio: un sistema di localizzazione per il rilevamento della presenza di persone in tempo reale in un ambiente chiuso e/o per la registrazione in realtà aumentata (AR) e il monitoraggio continuo dell'aule scolastiche per la gestione in contemporanea di tutti i domini dell'IEQ. Questo sistema multi-dominio potrà essere implementato in diversi prodotti per l'edilizia quali controsoffitti, pannelli a parete e divisori.

Per questo motivo nel presente elaborato ci si focalizzerà sui temi dell'IEQ nelle aule scolastiche monitorando tutti quei valori che ci permettono di comprendere l'effettivo comfort dell'utente all'interno dell'aula.

La crescente attenzione che negli ultimi decenni si sta riponendo verso il tema della Qualità Ambientale Interna (IEQ) scaturisce dal fatto che ogni giorno passiamo circa il 90% del tempo in luoghi al chiuso, e la recente pandemia di COVID-19 ha accentuato ancora di più questo aspetto, evidenziando come soprattutto in ambienti confinati sia necessario trovare una condizione di benessere. La pandemia, infatti, ha messo in luce diverse problematiche relative alla qualità dell'aria negli ambienti indoor soprattutto in spazi pubblici come uffici e scuole dove vi sono utenti molto giovani e sono stati registrati aumenti nei numeri di persone che si ammalavano a causa della maggiore concentrazione di inquinanti negli spazi al chiuso. Ridurre gli impatti ambientali del costruito, migliorare le prestazioni energetiche degli edifici e salvaguardare il benessere degli occupanti attraverso una corretta valutazione della Qualità Ambientale Interna (IEQ), è diventato un obiettivo comune di gran parte della comunità tecnico scientifica.

IEQ sta per *Indoor Environmental Quality* ed è "quella particolare condizione di benessere determinata, in funzione delle percezioni sensoriali di un individuo inserito in un ambiente, da temperatura, umidità dell'aria e livello di rumorosità e luminosità rilevati all'interno dell'ambiente". Si riferisce alla qualità dell'ambiente indoor, ovvero alle condizioni ambientali all'interno degli edifici che possono influenzare il benessere, la salute e la produttività delle persone che vi risiedono o lavorano.

L'IEQ comprende quattro domini:

1. Qualità dell'aria interna (IAQ): Si riferisce alla purezza dell'aria all'interno di un edificio con riguardo alla presenza di agenti inquinanti come particelle sospese, composti organici volatili (COV), muffe, allergeni e gas nocivi. Una buona qualità dell'aria interna contribuisce a prevenire problemi respiratori, allergie e altre malattie.
2. Illuminazione: Riguarda la quantità e la qualità della luce all'interno di un edificio. Una buona illuminazione naturale e artificiale è importante per la vista, il comfort visivo e il benessere psicologico delle persone.

3. Acustica: Si riferisce al livello di rumore all'interno di un edificio poiché anche un'acustica adeguata contribuisce a ridurre il rumore di fondo e a fornire un ambiente tranquillo e confortevole per le persone.
4. Comfort termico: Riguarda la temperatura, l'umidità e la ventilazione dell'ambiente interno. Un comfort termico adeguato assicura che le persone si sentano a proprio agio e influisce sulla produttività e sul benessere.

L'obiettivo dell'IEQ è creare un ambiente interno sano, sicuro e confortevole per le persone. Ciò richiede una progettazione, una costruzione e una manutenzione accurata degli edifici, nonché un'adeguata gestione degli impianti. Una buona IEQ può migliorare la produttività, la soddisfazione e la salute degli occupanti degli edifici, sia che si tratti di abitazioni, uffici, scuole o altri spazi indoor.[1]

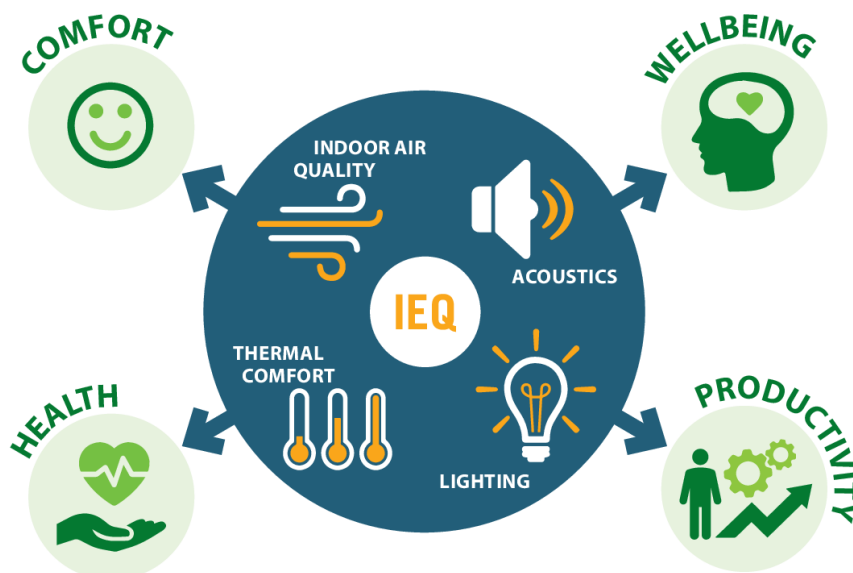


Figura 1 _Indoor environmental quality

L'uomo ha la capacità di adattarsi facilmente alle condizioni circostanti in termini di temperatura, rumore, qualità dell'aria e livelli di illuminazione. È importante comprendere il ruolo di questi parametri, spesso definiti come "parametri di qualità dell'ambiente interno", che influiscono sul benessere generale degli occupanti. Nel seguito verranno illustrati più nello specifico i 4 domini del comfort.

Qualità dell'aria:

L'aria nel nostro ambiente interno o esterno è una miscela di gas, principalmente azoto e ossigeno, insieme ad altri componenti come CO₂, vapore acqueo e una quantità nominale di altri gas. Tuttavia, contiene anche inquinanti sotto forma di particolato (PM), composti organici volatili (formaldeide, toluene, benzene e altri), che vengono emessi a causa di attività antropiche come i gas di scarico di veicoli o fabbriche o a volte attraverso eventi naturali. Un altro tipo di inquinante sono i microbi, la maggior parte di essi sono innocui per noi esseri umani ma alcuni di essi possono essere davvero dannosi.

Pertanto, diventa fondamentale che l'aria respirabile abbia una composizione equilibrata mantenendo i costituenti dell'aria entro i limiti consentiti definiti da norme o linee guida locali e internazionali.

Una volta che questo equilibrio desiderato viene disturbato, può portare a problemi respiratori acuti o cronici a seconda delle condizioni di salute di base dell'occupante, delle attività quotidiane e della gravità dell'esposizione. Infatti, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) identifica la IAQ come un elemento critico con un'influenza sostanziale sul benessere, la salute e le prestazioni degli occupanti. Riconoscendone l'importanza, l'OMS ha delineato una serie di sintomi noti come sindrome dell'edificio malato (SBS), che includono difficoltà di concentrazione, irritazione della pelle e affaticamento, comunemente riportati dagli occupanti di molti spazi interni. Recenti ricerche sottolineano il profondo impatto dell'IAQ sulla produttività, la concentrazione, il comfort e la salute fisica e mentale. Anidride carbonica (CO₂) e i composti organici volatili (VOC), sono tra i principali inquinanti dell'aria interna associati ai sintomi della SBS come mal di testa, affaticamento e asma.[2]

Comfort termico:

Il comfort termico consiste nell'essere in grado di sentirsi a proprio agio con la temperatura, l'umidità e il movimento dell'aria secondo le condizioni meteorologiche locali. La condizione di comfort dipende anche dall'abbigliamento, dalle attività, dall'età e dal sesso della persona.

Se un occupante si trova in condizioni di caldo o freddo per un periodo di tempo prolungato, può comportare una riduzione delle capacità cognitive e, quindi, della produttività.

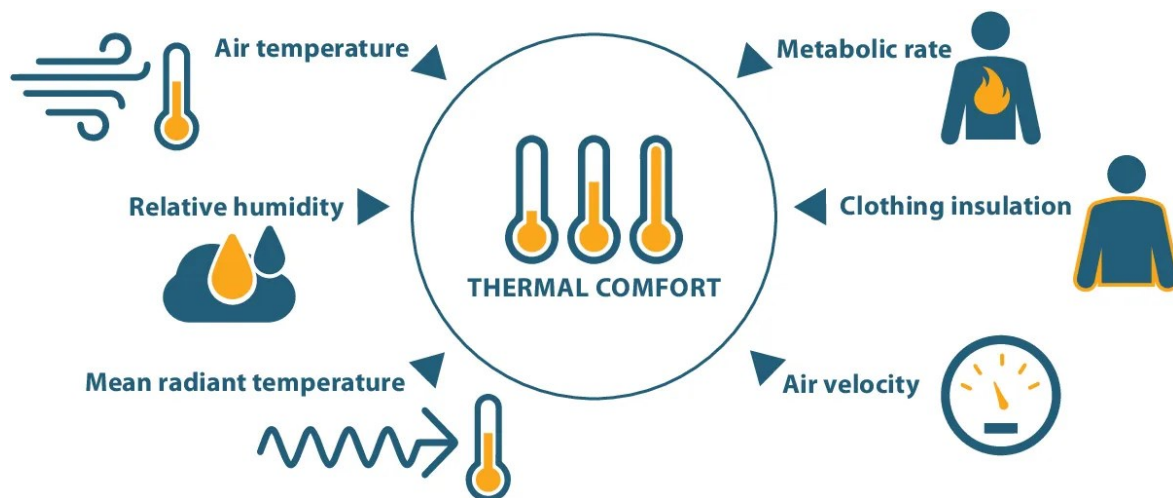


Figura 2_Comfort termico

Oggi, uno dei parametri più importanti da tenere in considerazione nella progettazione degli edifici è proprio il comfort termico. È definito nella norma ISO 7730 come "Lo stato d'animo che esprime soddisfazione per l'ambiente termico che ci circonda".

L'uomo considera l'ambiente confortevole se non è presente nessun tipo di disagio termico; quindi, la prima condizione di comfort è la neutralità termica, che significa che una persona non si sente né in condizioni troppo calde né troppo fredde. Quando la temperatura della pelle scende al di sotto dei 34°C, i nostri sensori del freddo iniziano a inviare impulsi al cervello, e man mano che la temperatura continua a scendere, gli impulsi aumentano di numero.

Allo stesso modo, il sensore di calore del corpo invia impulsi quando la temperatura supera i 37°C, e all'aumentare della temperatura, aumenta il numero di impulsi. Si ritiene che siano i segnali provenienti da questi due sistemi di sensori che costituiscono la base per la nostra valutazione delle condizioni di comfort dell'ambiente.

Per mantenere il comfort termico devono essere soddisfatte due condizioni. La prima è che l'effettiva combinazione di temperatura cutanea e temperatura interna del corpo fornisca una sensazione di neutralità termica. La seconda è il compimento dell'equilibrio energetico del corpo: il calore prodotto dal metabolismo dovrebbe essere uguale alla quantità di calore persa dal corpo. [3]

Comfort acustico

In un ambiente chiuso una persona può essere distratta da fonti di rumore interno come attrezzature (aspirapolvere, TV o impianti di ventilazione), rendendo difficile concentrarsi su attività come lavorare o studiare. Si tratta anche di "*qualità acustica complessiva*" che include eco, chiarezza del parlato con conseguente senso di quiete, e ci consente di concentrarci per un lungo periodo. L'utente può essere disturbato anche da fonti di rumore provenienti dall'esterno come traffico di veicoli, vicinanza di stazioni ferroviarie e traffico aereo.

Essere esposti a condizioni rumorose a lungo termine può portare a stanchezza mentale, disturbi del sonno e incapacità di concentrazione. Diventa quindi importante prestare attenzione all'aspetto acustico degli edifici, largamente trascurato nel passato. Nel presente elaborato non verrà discusso di questo dominio del comfort.

Comfort visivo

Il comfort visivo è una reazione soggettiva alla quantità e alla qualità della luce all'interno di un dato spazio in un dato momento.

Poiché l'occhio umano si adatta continuamente ai livelli di luce circostanti, una drastica variazione in termini di luminosità o contrasto può causare stress e affaticamento degli occhi. L'impatto può dipendere dai seguenti fattori: il tipo di luce (fioca o luminosa), il tempo di esposizione (lunga o breve) e l'età di una persona, poiché le persone anziane sono più sensibili ai livelli di illuminazione.

Nell'ambito della nostra capacità di controllare i parametri che ci causano disagio, cerchiamo di massimizzare il nostro comfort.[4]

2 Stato dell'arte e problematiche irrisolte

2.1 Caratterizzazione tipologica delle costruzioni scolastiche

Le persone trascorrono il 60-90% della loro vita in ambienti chiusi (casa, uffici, scuole, ecc.), dove l'aria è fino a cinque volte più inquinata di quella esterna [5]. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), la scarsa qualità dell'aria interna (IAQ) è altamente correlata a diversi problemi di salute, tra cui malattie respiratorie, asma, allergie, malattie cardiovascolari e neurologiche e cancro [5][6][7][8][9].

Sadat Korsavi et al. [10] hanno dimostrato che i principali fattori che influenzano la IAQ negli edifici rientrano in tre categorie: contesto (il clima o la stagione), occupante (comportamento, manutenzione, occupazione, livello di attività) e l'edificio (tenuta dell'aria, ubicazione della scuola, progettazione delle aule e delle finestre, tipo di ventilazione, tasso di ventilazione, ecc.) Data la complessità dei fattori presenti e l'eterogeneità del patrimonio edilizio scolastico, sarebbe utile poter identificare archetipi rappresentativi delle scuole, ma ancor più del modulo funzionale minimo di cui la scuola è composta e dove gli studenti soggiornano più a lungo, ovvero l'aula scolastica.

In letteratura, gli archetipi sono stati spesso utilizzati per un'ampia gamma di obiettivi di ricerca, come ad esempio pianificazione energetica urbana[11] [12], la mitigazione dei cambiamenti climatici [13], l'analisi del retrofit del patrimonio edilizio [14][15][16][17] o la valutazione del potenziale di risparmio energetico di varie tecnologie [18][19][20].

Una recente rassegna[21] ha mostrato che la maggior parte degli archetipi sono stati creati per edifici residenziali [22] e in pochi casi per edifici scolastici [23][24][25][26], dove i dati analizzati sono tipicamente l'età, la superficie e la forma dell'edificio, il consumo energetico, il rapporto finestre-pareti, il numero di piani e il numero di studenti. Solo Portella et al. [23] considerano tra le variabili anche il tasso di ventilazione. I sistemi di ventilazione, invece, sono raramente inclusi, soprattutto perché assenti dalla maggior parte dei set di dati[27].

2.2 IEQ nelle aule scolastiche

Il comfort termico, acustico e visivo degli ambienti, insieme alla qualità dell'aria interna (IAQ), sono elementi essenziali per il benessere e la salute di coloro che occupano gli edifici. Ciò è particolarmente importante nel caso degli edifici scolastici, in cui è possibile analizzare quanto tali fattori siano collegati anche all'attenzione e al rendimento.

Le scuole diventano così luoghi di eccellenza sia per contribuirne allo studio degli impatti, che per la sperimentazione di nuove modalità di azioni di educazione e sensibilizzazione, che hanno come obiettivo finale il cambiamento del comportamento e l'adozione di nuove abitudini da riportare in ambiente familiare e domestico.

Un numero significativo di studi ha indicato che gli effetti di una cattiva IAQ sono più pronunciati nei bambini in età scolare, a causa di diversi fattori. Tra questi, una frequenza respiratoria più elevata (circa il 50% in più rispetto agli adulti)[28][29], vie respiratorie più strette[30][31], un sistema immunitario poco sviluppato [32] e quindi una difesa limitata contro le infezioni[31].

Di conseguenza, dato che i bambini trascorrono fino a 1075 ore in classe ogni anno[33], è di fondamentale importanza monitorare e migliorare i livelli di IAQ nelle aule. Oltre a nuocere alla salute, livelli di IAQ scadenti limitano anche le capacità cognitive e di concentrazione, che sono fondamentali in un ambiente di apprendimento[34][35].

Per descrivere l'IAQ l'indicatore più utilizzato nelle aule scolastiche è la concentrazione di anidride carbonica (CO₂) [36][37] in quanto direttamente correlata con l'elevato indice di affollamento tipico di questi ambienti [38] e con l'identificazione della sindrome dell'edificio malato (SBS) [39]. In effetti, molti modelli per la previsione della concentrazione di CO₂ in ambiente si basano sul numero di occupanti. Tajima et al. [40] hanno creato equazioni basate sul respiro espirato da soggetti giapponesi considerando vari fattori personali (altezza, peso, sesso, età). Persily et al. [41][42] hanno introdotto un metodo per stimare il tasso di generazione di CO₂ basato sul metabolismo umano e sul dispendio energetico[43], che tiene conto delle caratteristiche degli occupanti. Altri metodi di previsione della CO₂ si basano su dati climatici interni[44][45][46].

La concentrazione di anidride carbonica è stata valutata anche in un recente studio portato avanti da Mary Myla Andamon et al. secondo il quale le misurazioni dei livelli di concentrazione di CO₂ effettuate in 10 aule, erano superiori al limite 1000 ppm nel 70% delle aule analizzate. Inoltre, tale studio tiene in conto della ventilazione naturale intermittente e aria condizionata per il raffreddamento o il riscaldamento sottolineando l'importanza della caratterizzazione della ventilazione e della qualità dell'aria nelle aule[47]. Il sistema di ventilazione è infatti un aspetto fondamentale per migliorare la progettazione delle aule e sensibilizzare sull'importanza della ventilazione dell'aula per il rendimento scolastico e la salute degli occupanti.

Uno studio effettuato su un campione di 75 aule danesi mostra che oltre alla CO₂ anche i TVOC (composti organici volatili) sono responsabili dell'inquinamento dell'aria nelle aule; infatti, dall'analisi emerge un aumento significativo delle concentrazioni di TVOC durante l'orario scolastico e un aumento giornaliero dei livelli di TVOC al mattino, dovuto a una ventilazione insufficiente nei giorni precedenti. Il tipo di ventilazione è un fattore chiave che influenza i livelli di CO₂ e TVOC, a tal proposito anche se le aule con ventilazione meccanica hanno registrato livelli di CO₂ e TVOC significativamente più bassi rispetto alle aule con ventilazione naturale, tutte le aule hanno superato i valori delle linee guida di 1000 ppm, con il 70% delle aule che hanno superato questo valore per più della metà del tempo di occupazione[48].

È importante valutare la relazione tra gli inquinanti dell'aria nelle aule ed altri fattori come le caratteristiche fisiche dell'aula, la ventilazione e l'occupazione. Questo è stato fatto da Sarkawt Hama et al. in un lavoro di ricerca in cui sono state monitorate le concentrazioni di particolato (PM) e CO₂ e il comfort termico (umidità relativa e temperatura) in cinque scuole di Londra. I risultati sono stati confrontati tra ore occupate e non occupate per valutare l'impatto degli occupanti ed è emerso che i livelli di CO₂ e PM durante l'occupazione erano più alti rispetto alla non occupazione così come la temperatura media. Anche questo studio introduce il tema della ventilazione nelle aule perché registra una riduzione della concentrazione di PM molto elevata con la doppia ventilazione (meccanica + naturale), rispetto alla ventilazione naturale (porta + finestra)[49].

Gli studi sopra citati correlano la qualità dell'aria registrata nelle aule con la ventilazione naturale e meccanica ma in nessuno studio viene effettuato un confronto tra tipologie distinte di ventilazione meccanica controllata.

Il comfort termico insieme alla qualità dell'aria, al benessere acustico e visivo è uno dei domini fondamentali per l'IEQ nelle aule e sono stati sviluppati diversi approcci per valutarlo ad esempio uno studio condotto in una scuola secondaria ad Abuja, in Nigeria, confronta la valutazione soggettiva, la misurazione sul campo e metodi di simulazione di aule ventilate in modo naturale. Attraverso misurazioni sul campo ed indagini con questionari, sono state ricavate temperatura operativa di comfort effettiva media e un PMV attendibili[50].

Nell'ambito del comfort termico numerosi studi sono stati condotti in ambienti termicamente uniformi, mentre sono molto meno numerosi quelli condotti in condizioni termiche non uniformi. La letteratura evidenzia uno studio che propone la valutazione di risposte termiche di persone fragili utilizzando un manichino termico in una camera di prova dotata di sistemi di raffreddamento e riscaldamento a pavimento. Il manichino termico in questione è capace di acquisire la temperatura della pelle e le risposte in termini di comfort termico di maschi e femmine ed ha mostrato una differenza significativa tra i due sessi. Inoltre, tale studio dimostra che il disagio termico nelle persone fragili ha origine in gran parte dalla temperatura dell'aria.[51]

Per quanto concerne il benessere visivo è opportuno indagare i livelli di luce ottimali per gli utenti delle scuole. Uno studio ha raccolto misurazioni di variabili ambientali, sperimentazioni su sistemi di tende e luci utilizzando moduli e telecamere time-lapse e questionari sulle sensazioni visive in un campione di aule ventilate naturalmente. Lo studio ha riportato risultati che suggeriscono che le tende verticali possono essere una scelta migliore per le aule scolastiche, in quanto le loro lamelle possono essere regolate per controllare la luce solare diretta, e consentono la ventilazione piuttosto che le tende a rullo [52].

2.3 Obiettivi

Il presente studio si focalizzerà sulla creazione di un database delle scuole della Regione Marche dotate di Impianti di Ventilazione Meccanica Controllata, sull'identificazione di archetipi di aula ovvero di modelli rappresentativi che identifichino le aule come cellule primarie della scuola e non considerando solo l'intero edificio scolastico perché l'aula è il luogo in cui lo studente trascorre la maggior parte del tempo. Ogni aula verrà analizzata geometricamente al fine di individuare l'archetipo che la identifica e si calcolerà anche la percentuale finestrata tipica per ognuno di essi.

Inoltre, si propone una sperimentazione su due aule di due scuole della Regione Marche dotate di sistemi VMC diversi per identificare le principali caratteristiche microclimatiche che le differenziano, le concentrazioni tipiche di CO₂ durante il normale svolgimento delle lezioni in aula e in generale i livelli di comfort attraverso la creazione di mappe termiche sfruttando l'utilizzo di strumenti convenzionali per l'acquisizione di dati e di un manichino termico che simula il comfort percepito da un individuo adulto.

3 Metodo

3.1 Analisi tipologica

Nel seguito verrà illustrata la metodologia per l'identificazione di un campione di scuole rappresentative nella regione Marche dotate di ventilazione meccanica controllata (VMC) al fine di individuarne due per la misura sperimentale dei parametri di microclima e qualità dell'aria interna.

In primo luogo, è stato selezionato l'intero patrimonio edilizio scolastico regionale, dal quale sono stati estrapolati tutti gli edifici dotati di VMC. In secondo luogo, è stata condotta un'analisi tipologica sulla base di informazioni geometriche dell'aula e delle finestre in essa presenti al fine di identificare archetipi di aule. Successivamente sono state prese due aule tipo di due scuole del campione per effettuare un'indagine sperimentale sui dati climatici e del comfort acquisiti al loro interno.

Definizione del campione

La ricerca si basa interamente sugli edifici scolastici censiti all'interno dell'anagrafe scolastica nazionale messa a disposizione dal "Ministero dell'Istruzione e del Merito" (MIM). Attraverso il "Portale unico dei dati scolastici"[53] istituito con la Legge 107/2015 [54] è possibile ottenere informazioni, categorizzate per temi in diversi database, per tutte le scuole di ogni ordine e grado: asili nido (0-3 anni), scuole materne (3-6 anni), scuole elementari (6-10 anni), scuole medie (11-13 anni) e scuole superiori (14-19 anni).

Le informazioni estrapolate dai vari database sono descritte nel di seguito:

- 1) Dal database EDIANAGRAFESTA sono stati estrapolati dati relativi all'identificazione dell'edificio ovvero
 - a) Anno Scolastico;
 - b) Codice Scuola relativo al plesso;
 - c) Codice Edificio che identifica univocamente l'edificio;
 - d) Codice Comune è il codice catastale del comune dell'edificio;
 - e) Sigla Provincia;
 - f) Tipologia Indirizzo è la tipologia di recapito dell'indirizzo (es: via o piazza o largo ecc.);
 - g) Denominazione Indirizzo;
 - h) Numero Civico;
 - i) CAP.
- 2) Dal database EDIETAORIGINESTA sono stati estrapolati i dati relativi all'origine dell'edificio e all'uso dello stesso
 - a) Uso Scolastico ci indica se l'edificio è stato costruito per uso scolastico (a volte potrebbe essere un dato non definito);
 - b) Altri Usi ci indica se è stato costruito per usi non scolastici e successivamente è stato adattato ad uso scolastico;
 - c) Anno Costruzione;
 - d) Periodo Costruzione è un intervallo temporale entro cui è stato costruito l'edificio;
 - e) Anno Adattamento è l'eventuale anno in cui l'edificio è stato adattato all'uso scolastico;
 - f) Periodo Adattamento è l'intervallo temporale in cui è avvenuto l'adattamento dell'edificio ad uso scolastico.

Questo database è stato compilato inserendo o l'anno di costruzione esatto oppure un periodo di costruzione di riferimento.

- 3) Dal database EDICONSISTENZASTA sono stati estrapolati dati geometrici del lotto che comprende l'edificio stesso
- a) Superficie Totale Area Scolastica;
 - b) Superficie Totale Area Libera riferita alla superficie dell'area libera interna all'area scolastica;
 - c) Volume Lordo Edificio;
 - d) Numero Complessivo Piani;
- Oltre i dati riportati al presente punto, è stata aggiunta l'informazione Superficie Area Coperta, ricavata manualmente dalla sottrazione tra la superficie totale area scolastica (è la superficie totale del lotto su cui insiste l'edificio, quindi, è comprensiva dell'edificio stesso, delle aree verdi, delle aree pedonali, aree carrabili ed eventuali parcheggi) e la superficie totale area libera (è la superficie totale delle aree interne al lotto non interessate da edifici).
- 4) Dal database EDIAMBIENTESTA sono stati estrapolati dati relativi l'ambiente circostante la scuola per capire se sono presenti fonti di sostanze inquinanti nelle vicinanze dell'area scolastica
- a) Contesto senza disturbi indica se l'edificio è inserito in un contesto ambientale con presenza di elementi di disturbo;
 - b) Vicinanza Discarica tale dato andrà inserito solo se il dato precedente relativo al contesto con presenza di disturbi è affermativo;
 - c) Vicinanza Industrie Inquinanti indica se nelle vicinanze dell'edificio sono presenti industrie inquinanti o di emissioni gassose. Anche questo dato va inserito solo se il contesto risulta con presenza di disturbi;
 - d) Vicinanza Acque Inquinanti indica se sono presenti acque, canali, stagni inquinati o stagnanti. Il dato va segnalato solo se il contesto è con presenza di disturbi;
 - e) Vicinanza Fonti di Inquinamento Atmosferico il dato va segnalato solo se il contesto è con presenza di disturbi;
 - f) Vicinanza Fonti di Inquinamento Acustico il dato va segnalato solo se il contesto è con presenza di disturbi;
 - g) Vicinanza Sorgenti Radiazioni Elettromagnetiche Indica se nelle vicinanze dell'edificio sono presenti sorgenti di radiazioni elettromagnetiche. il dato va segnalato solo se il contesto è con presenza di disturbi;
 - h) Vicinanza Cimiteri indica la presenza di cimiteri nelle vicinanze dell'edificio. il dato va segnalato solo se il contesto è con presenza di disturbi;
 - i) Vicinanza altri disturbi;
 - j) Criticità Specifiche Area Scolastica indica se sono presenti criticità specifiche a carico dell'area di pertinenza dell'edificio scolastico;
 - k) Assenza Piazzola Adeguata indica se l'accesso all'area di pertinenza dell'edificio scolastico non è dotato di piazzola di adeguate dimensioni (dato disponibile soltanto se sono indicate come presenti criticità specifiche);
 - l) Area Non Recintata (dato disponibile soltanto se sono indicate come presenti criticità specifiche);
 - m) Presenza Grande Traffico Indica se l'area di pertinenza dell'edificio scolastico si trova in prossimità di precorsi di grande traffico (dato disponibile soltanto se sono indicate come presenti criticità specifiche);

- n) Presenza Transito Ferroviario indica se l'area di pertinenza dell'edificio scolastico si trova in prossimità di precorsi di transito ferroviario (dato disponibile soltanto se sono indicate come presenti criticità specifiche);
 - o) Preesistenze Industriali Abbandonate indica se l'area di pertinenza dell'edificio scolastico si trova in prossimità di preesistenze industriali abbandonate (dato disponibile soltanto se sono indicate come presenti criticità specifiche);
 - p) Zona Urbana Degradata indica se l'area di pertinenza dell'edificio scolastico si trova in prossimità di zona urbana degradata (dato disponibile soltanto se sono indicate come presenti criticità specifiche);
 - q) Vicinanza Industrie a Rischio indica se l'area di pertinenza dell'edificio scolastico si trova in prossimità di strutture industriali a rischio (dato disponibile soltanto se sono indicate come presenti criticità specifiche);
 - r) Altre Criticità Specifiche indica se sono presenti criticità specifiche ulteriori rispetto alle precedenti elencate (dato disponibile soltanto se sono indicate come presenti criticità specifiche).
- 5) Dal database EDIPROTEZRUMSTA, i dati relativi l'isolamento acustico dell'edificio
- a) Isolamenti Acustico indica se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la protezione dai rumori - isolamento acustico;
 - b) Isolamento Acustico Rumorosità Esterna indica se l'edificio è dotato di isolamento da rumori esterni (dato disponibile soltanto se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la protezione dai rumori);
 - c) Isolamento Interno indica se l'edificio è dotato di isolamento interno tra aule, corridoi, altri locali (dato disponibile soltanto se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la protezione dai rumori);
 - d) Isolamento Interno Piani Diversi indica se l'edificio è dotato di isolamento interno tra piani diversi (dato disponibile soltanto se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la protezione dai rumori);
 - e) Altro Specificare indica se l'edificio è dotato di altre tipologie di isolamento (dato disponibile soltanto se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la protezione dai rumori).
- 6) Dal Database EDIRIDUZCONSESTA sono stati estrapolati dati relativi la riduzione dei consumi energetici
- a) Accorgimenti Riduzione Consumi Energetici, indica se l'edificio è dotato di accorgimenti per ridurre i consumi energetici;
 - b) Vetri Doppi Serramenti Doppi, indica se l'edificio è dotato di doppi vetri o doppi serramenti (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la riduzione di consumi energetici);
 - c) Isolamento Coperture, indica se l'edificio è dotato di isolamento della copertura (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la riduzione di consumi energetici);
 - d) Isolamento Pareti Esterne, indica se l'edificio è dotato di isolamento delle pareti esterne (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la riduzione di consumi energetici);

- e) Zonizzazione Impianto Termico, indica se l'edificio è dotato di zonizzazione dell'impianto termico (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la riduzione di consumi energetici);
 - f) Impianto Solare Termico, indica se l'edificio è dotato di impianto solare termico (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la riduzione di consumi energetici);
 - g) Impianto Fotovoltaico, indica se l'edificio è dotato di impianto fotovoltaico (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di accorgimenti specifici per la riduzione di consumi energetici).
- 7) Dal Database EDIVINCOLISTA sono stati estrapolati dati relativi la presenza di Vincoli di vario tipo che interessano gli edifici
- a) Vincolo idrogeologico, indica se l'edificio si trova in un'area soggetta a vincolo idrogeologico;
 - b) Vincolo Paesaggistico, indica se l'edificio si trova in un'area soggetta a vincolo paesaggistico;
 - c) Edificio Tutelato, indica se l'edificio è tutelato ai sensi del D.Lgs. 22/01/2004 n. 42 (ex L.1089/39) Min. Beni e Attività Cult.;
 - d) Vincolo Interesse Culturale, indica se l'edificio è sottoposto a vincolo di interesse culturale (art. 12 D.lgs. 42/04);
 - e) Classificazione Sismica Nazionale, indica la classificazione sismica nazionale del Comune.
- 8) Dal Database EDIAMBFUNZSTA sono stati estrapolati dati relativi l'uso degli spazi all'interno della scuola
- a) Spazi Didattica;
 - b) Aule;
 - c) Aule Informatiche;
 - d) Aule Tecniche;
 - e) Spazi Collettivi;
 - f) Auditorium;
 - g) Mensa;
 - h) Palestra;
 - i) Piscina;
 - j) Spazi Amministrazione.
- 9) Dal Database EDIUNISTRUTSTA sono stati estrapolati dati strutturali dell'edificio secondo la normativa antisismica
- a) Codice Unità Strutturale, dall'a.s. 2021-2021, per ciascun edificio scolastico sono state individuate le Unità Strutturali (parti dell'edificio autonome e omogenee in termini di comportamento strutturale). Ciascun edificio può essere costituito da una o da più Unità Strutturali. Il dato identifica univocamente la singola Unità Strutturale;
 - b) Certificato Collaudo Statico, indica se l'unità strutturale è dotata del certificato di collaudo statico;
 - c) Progettato Normativa Tecnica Antisismica, indica se l'unità strutturale è stata progettata con la normativa tecnica antisismica;
 - d) Adeguamento Sismico, indica se l'unità strutturale, successivamente alla costruzione, è stata oggetto di interventi di adeguamento sismico;
 - e) Miglioramento sismico, indica se l'unità strutturale, successivamente alla costruzione, è stata oggetto di interventi di miglioramento sismico.

- 10) Dal Database EDITIPORISCSTA sono stati estrapolati dati relativi l'impianto di riscaldamento
- a) Impianto Riscaldamento, indica se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento;
 - b) Centralizzato Olio Combustibile, indica se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento centralizzato a olio combustibile (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento);
 - c) Centralizzato Gasolio, indica se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento centralizzato a gasolio (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento);
 - d) Centralizzato Metano, indica se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento centralizzato a metano (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento);
 - e) Centralizzato GPL, indica se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento centralizzato a G.P.L. (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento);
 - f) Corpi Scaldanti Elettrici Autonomi, indica se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento costituito da corpi scaldanti elettrici autonomi (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento);
 - g) Teleriscaldamento, indica se l'edificio è dotato di impianto di teleriscaldamento (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento);
 - h) Condizionamento Ventilazione, indica se l'edificio è dotato di impianto di condizionamento/ventilazione (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento);
 - i) Impianto Solare Termico, indica se l'edificio è dotato di impianto solare termico (il dato è disponibile soltanto se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento);
 - j) Altro impianto Riscaldamento, indica se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento diverso dai precedenti (dato disponibile soltanto se l'edificio è dotato di impianto di riscaldamento).

Il campione iniziale ovvero quello dell'anagrafe scolastica nazionale era costituito da tutte le scuole di ogni ordine e grado italiane di queste 1934 sono scuole marchigiane, sono stati esclusi edifici scolastici sprovvisti di dati sull'anno di costruzione, edifici scolastici in cui la superficie coperta dell'edificio non corrispondeva alla superficie dichiarata e tutti gli edifici non utilizzati per fini didattici (ad esempio uffici amministrativi, segreterie, ecc.) dunque sono state filtrate le scuole che avevano aule didattiche. Al termine del processo di filtraggio, sono stati identificati 1418 edifici scolastici della regione Marche. Dopo questa fase, grazie al database regionale, utilizzando il codice di identificazione dell'edificio (codice ARES) i dati dei 1418 edifici scolastici della Regione Marche sono stati uniti a quelli del database contenente una classificazione di scuole Marchigiane dove sono stati installati impianti di ventilazione meccanica controllata. I dati contenuti in questo database sono: codice ARES, nome scuola, tipologia scuola (elementare, media e superiore), indirizzo, comune, tipologia di impianto di VMC installato, numero di aule in cui è installato l'impianto, schede tecniche della macchina di ventilazione e tipologia di filtri della macchina. A seguito dell'integrazione tra database delle scuole regionali e database di scuole regionali dotate di VMC, le scuole risultanti sono 177 alle quali sono state escluse le scuole materne.

Delle 1934 scuole della regione, 177 (9%) sono risultate dotate di ventilazione meccanica, 150 sono state selezionate per effettuare lo studio sugli archetipi di aule (8%) e 102 (5%) sono state selezionate come campione per questo studio in quanto disponevano di planimetrie dalle quali estrapolare informazioni geometriche utili per caratterizzare le aule. (Figura 3)

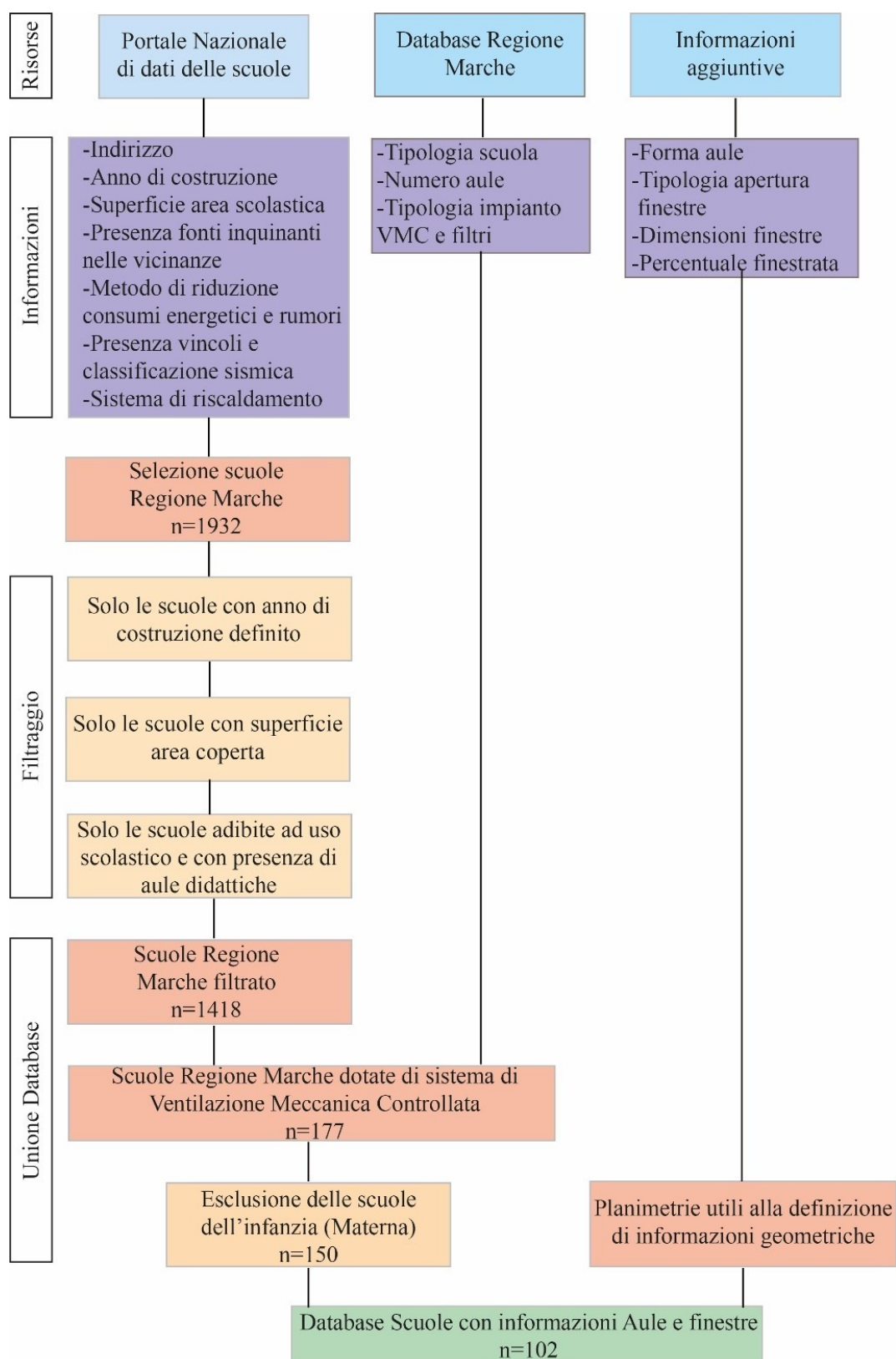


Figura 3_Schema del processo di unione database per ottenere il campione di scuole oggetto di analisi

Informazioni sulle classi

Per caratterizzare il modulo funzionale primario all'interno della scuola ovvero "aula" è stato effettuato un processo in tre fasi (Figura 3). Nella fase iniziale, sono stati estratti i dati dal database nazionale[53], che comprendevano informazioni generali sugli edifici scolastici. Tra questi, dettagli

quali l'ubicazione, il periodo di costruzione, i dati geometrici, l'ordine e il grado del complesso scolastico, la presenza di eventuali fonti inquinanti in prossimità dell'area scolastica, le misure adottate dalla scuola per ridurre i consumi energetici e per la protezione dal rumore e, infine, l'elenco degli impianti presenti. Nella seconda fase è stato consultato il database regionale delle scuole dotate di VMC per ottenere ulteriori informazioni sul sistema di ventilazione. Per ogni scuola sono state individuate il numero di aule dotate di ventilazione meccanica, il tipo di sistema di ventilazione installato (centralizzato o decentralizzato), il modello della macchina installata e il tipo di filtri adottati. Nella fase finale, per tutte le scuole del database regionale dotate di VMC, grazie alle planimetrie incluse nella documentazione, sono stati estrapolati dati per:

-Identificare archetipi aule (larghezza, lunghezza, altezza, area, volume, forma, numero alunni, tipo di impianto). Gli elaborati dai quali è stato possibile ricavarli sono stati planimetrie, computi metrici, schede tecniche e schemi per rendicontazioni. (l'aula era considerata "ricorrente" quando si presentava con la stessa forma per almeno metà delle classi presenti nella scuola in esame).

-Identificare informazioni sulle finestre (tipo di apertura, profondità, altezza, superficie finestrata e percentuale finestrata). Questi dati sono stati ricavati dalle planimetrie delle scuole.

3.2 Analisi fattore medio di luce diurna

Per quanto riguarda le percentuali finestrate individuate, sono state condotte anche delle simulazioni per verificare il fattore medio di luce diurna secondo la norma UNI EN 12464-1 (Figura 54-Capitolo 4.2 Analisi fattore medio di luce diurna) utilizzando il software VELUX Daylight Visualizer 3. Il software permette di inserire i dati geometrici dell'aula come dimensioni della parete (larghezza, lunghezza, spessore e altezza), tipologia di rivestimenti, presenza di tetto e varie tipologie di finestre al fine di sviluppare un render e calcolare il fattore medio di luce diurna. Di seguito verranno spiegati gli step che hanno condotto al risultato finale.

Il primo passo è quello di creare un nuovo progetto e dalla schermata del menu si procede alla sua realizzazione partendo dalla sezione pavimento/muri. È possibile selezionare la tipologia di muro, cioè, perimetrale o esterno e specificare larghezza, altezza e spessore, muovendo il cursore nella schermata di modellazione si può tracciare il muro precedentemente caratterizzato (Figura 4).

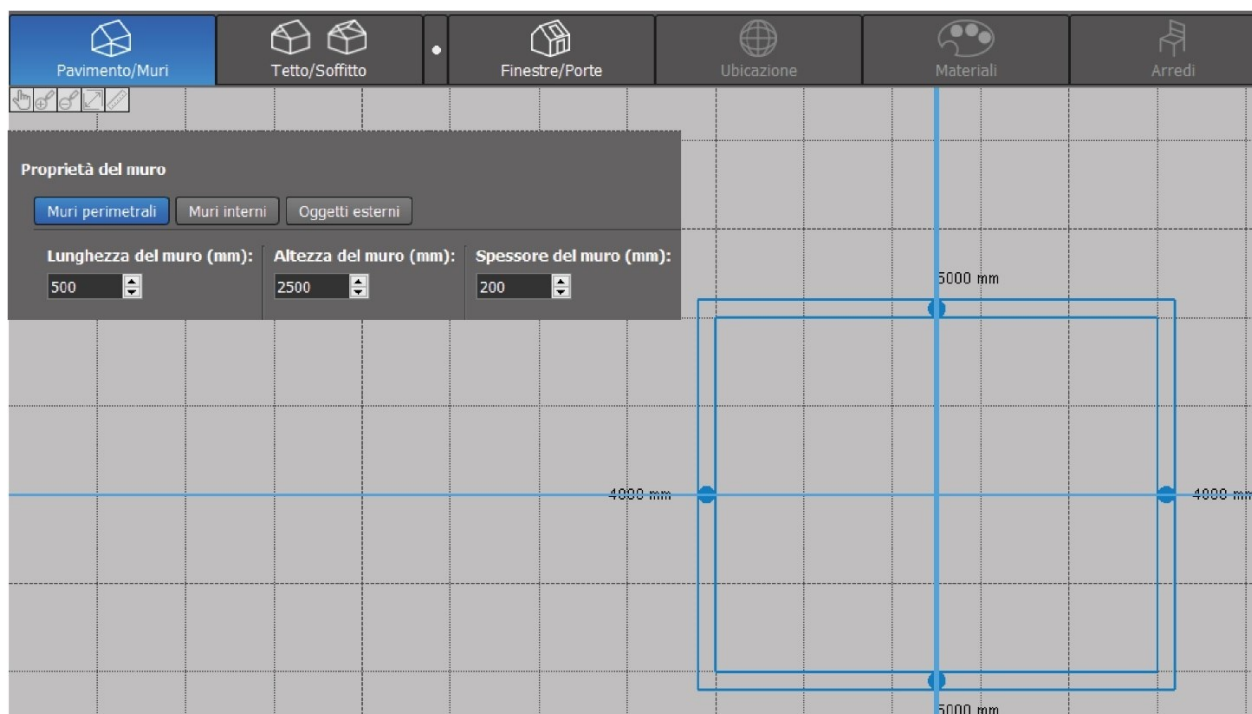


Figura 4_Velux Daylight step 1 inserimento muri

Il passo successivo consiste nell'inserimento del solaio di piano attraverso la sezione Tetto/soffitto dalla barra del menu. È possibile determinare la tipologia di tetto, piano a falde, l'inclinazione e lo spessore. (Figura 5)

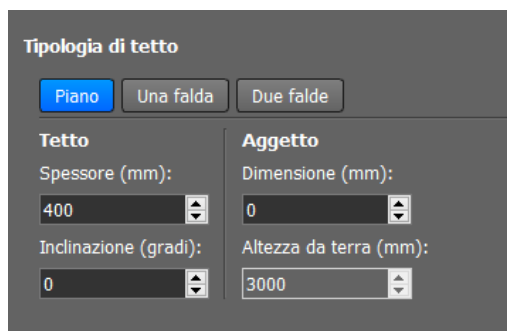


Figura 5_Velux Daylight Step 2 inserimento solaio

Successivamente vengono inserite le finestre, dalla barra del menù si seleziona la sezione Finestre/Porte, appare una schermata per la selezione della tipologia di finestra in cui è possibile inserire dimensioni geometriche della finestra e proprietà imbotte. (Figura 6)

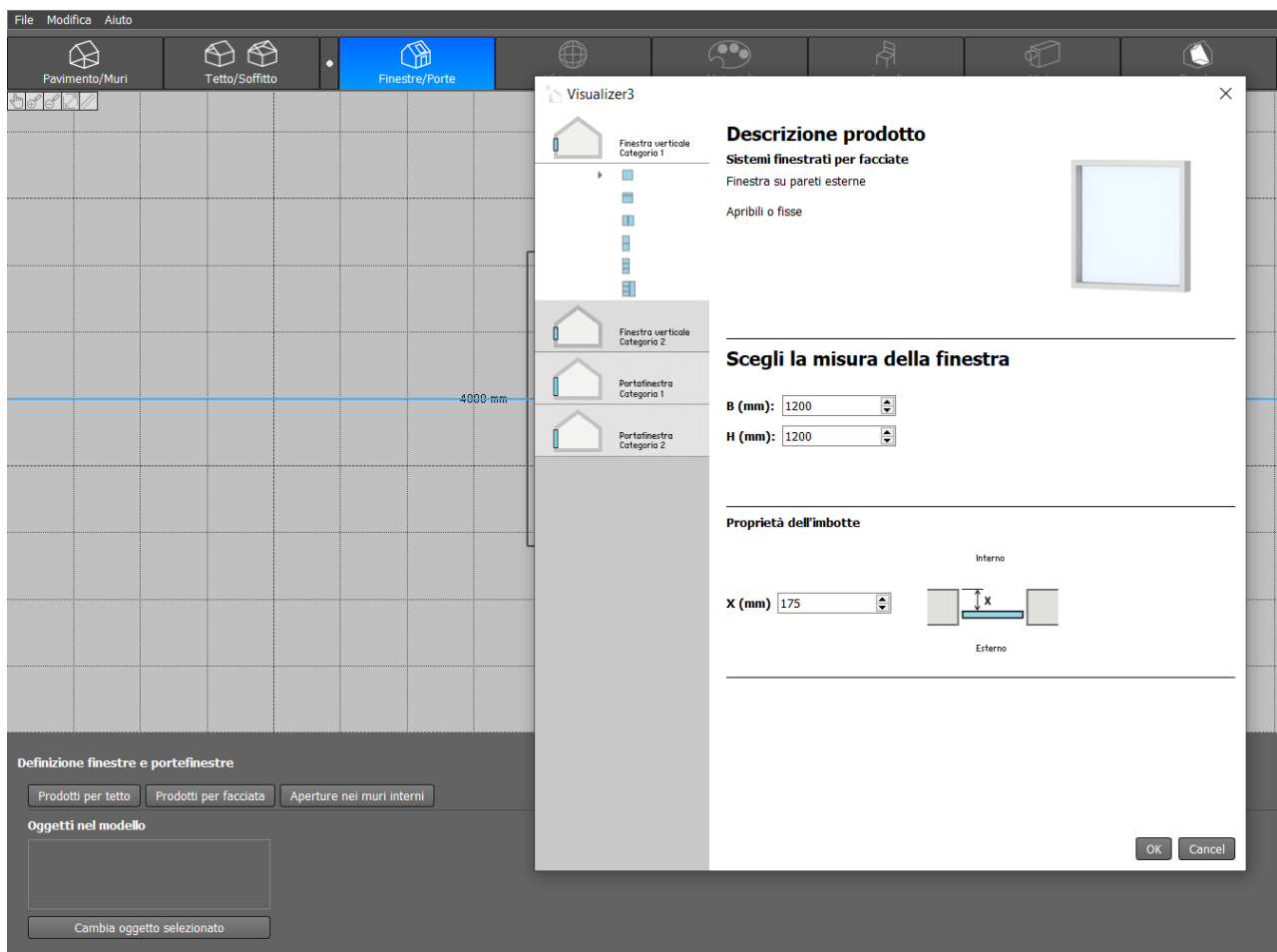


Figura 6_Velux Daylight step 3 inserimento finestra

Una volta determinate le caratteristiche della finestra si procede all'inserimento della stessa nel modello, posizionando il cursore sopra ai muri precedentemente disegnati al primo step, viene visualizzata automaticamente la finestra ed è possibile specificare manualmente la distanza dal muro e l'altezza da terra. Il programma indica in modo automatico la superficie finestrata. (Figura 7)

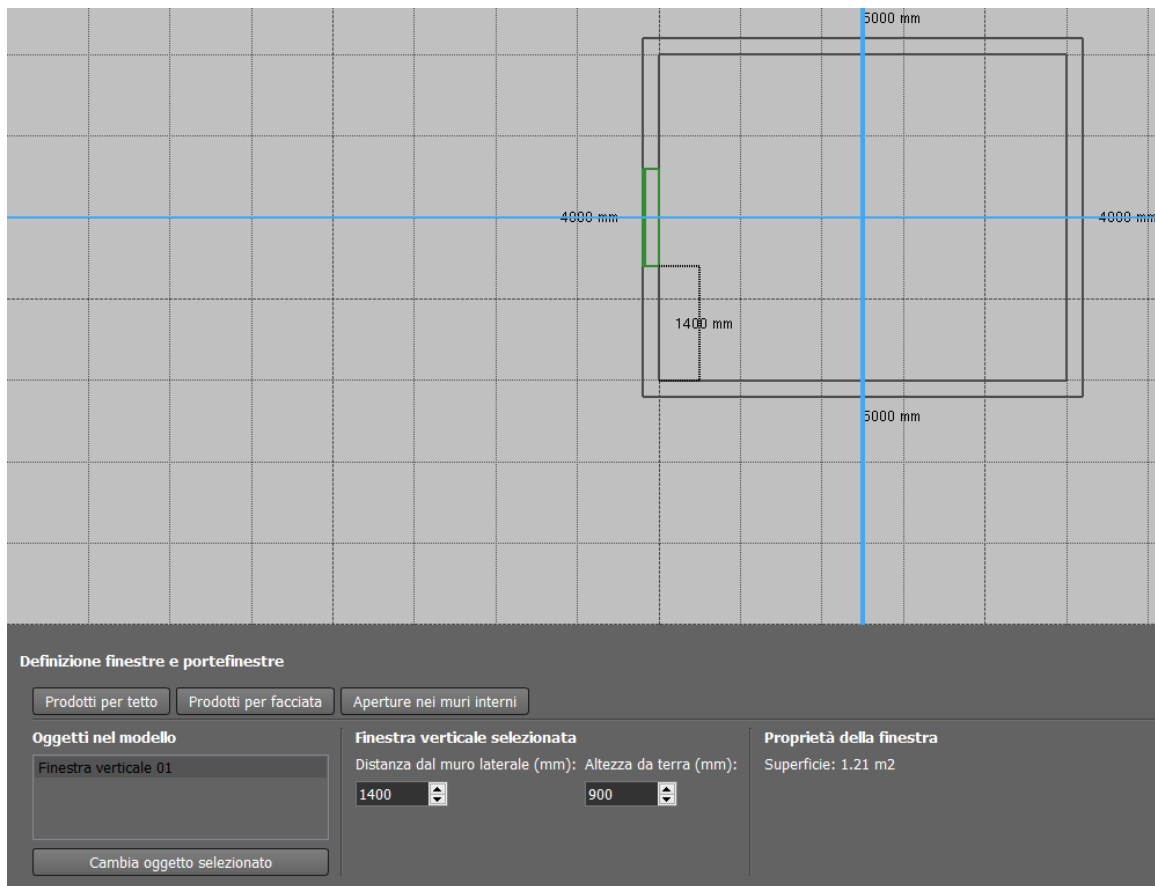


Figura 7_Velux Daylight step 4 inserimento finestra nel modello

Step successivo è quello di impostare l'ubicazione e tra le opzioni l'unica città italiana disponibile è Roma. (Figura 8)

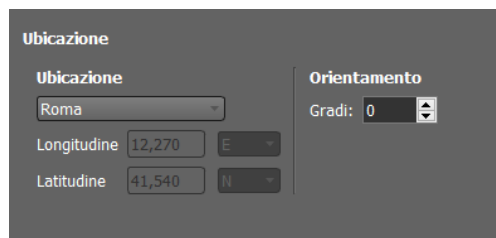


Figura 8_Velux Daylight step 5 Ubicazione modello

Si procede con l'ultimo step accedendo alla sezione render, si spunta la tipologia di render tra Illuminamento e fattore medio di luce diurna, le condizioni del cielo vengono impostate come coperto (1), si imposta la risoluzione e si procede alla visualizzazione del render (Figura 9). Si rimanda al capitolo 4.2 Analisi fattore medio di luce diurna.

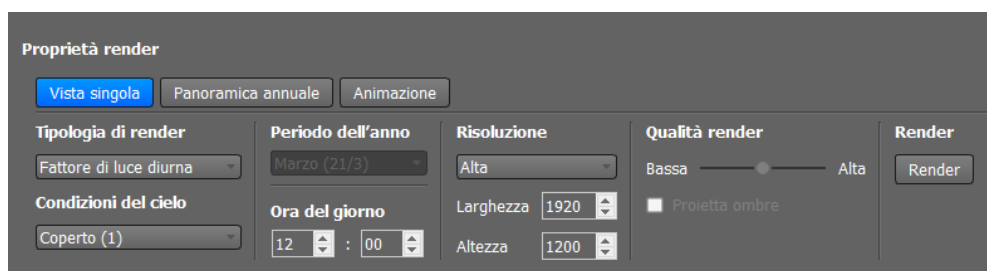


Figura 9_Velux Daylight step 6 render

3.3 Analisi sperimentale su due casi studio a confronto

Dopo aver individuato, a seguito dell'analisi tipologica effettuata su tutte le scuole della Regione Marche, due casi studio, cioè, due aule di due scuole del campione, sono state analizzate dettagliatamente tutte le caratteristiche delle due scuole e ancor più nello specifico delle due aule sulle quali sono state effettuate misurazioni al fine di ottenere un'analisi sperimentale del comfort interno e confrontare i risultati ottenuti. Queste scuole sono state scelte a seconda dell'impianto VMC installato in esse; infatti, una ricade nella categoria di impianto Delocalizzato con unità interna all'aula (Falconara) e l'altra ricade nella tipologia di impianto delocalizzato con unità interna e canali interni (Recanati).

3.3.1 Generalità dei due casi studio

Si discuterà in primo luogo delle generalità delle due scuole e delle aule scelte per i monitoraggi, si farà anche riferimento agli impianti installati nelle aule e al calcolo delle portate di ventilazione.

Informazioni scuola e aula

Nella prima tabella illustrata nel presente capitolo (Tabella 1) sono indicati dati relativi alle informazioni generali della scuola ricavate da informazioni acquisite durante i monitoraggi (es: misurazione dimensioni aula).

Dati scuola e aula		
Ubicazione	FALCONARA	RECANATI
Numero aula	Aula 6	Aula 10
Nome scuola	G. Ferraris	Quartiere Le Grazie
Indirizzo	Via Tito Speri 32, Falconara Marittima (AN)	Via San Vicino 3, Recanati (MC)
Tipologia scuola	Scuola Secondaria di Primo Grado (Media)	Scuola Primaria (Elementare)
Orario scolastico	8:00 - 13:45 dal lunedì al venerdì	8:20 - 16:20 dal lunedì al venerdì
Data sopralluogo	11/05/2023	12/05/2023
Denominazione aula	6	10
Tipologia aula	Didattica	Didattica
Piano	Piano Terra	Piano Primo
N° studenti	22+1 insegnante	24+1 insegnante
Superficie aula [m ²]	48,90	44,80
Altezza aula [m]	3,00	2,97
Volume aula [m ³]	146,70	133,06

Tabella 1 __ Tabella con i dati generali delle due scuole

Informazioni VMC installate nelle aule

Per quanto riguarda le macchine di ventilazione meccanica controllata, tutte risultano avere un controllo manuale (modificabile dall'utente-insegnante) della portata d'aria di mandata/estrazione. Pertanto, l'utilizzo della ventilazione meccanica è a completa discrezione dell'insegnante all'interno dell'aula. Il dimensionamento delle macchine di ventilazione è stato effettuato considerando le portate di ventilazione calcolate in conformità alle normative nazionali DM 18/12/1975 [55] e UNI 10339 [56] in funzione rispettivamente dei ricambi d'aria per ora (1/h) e della portata d'aria esterna per studente (10-3 m³/s pers) previsti per ogni ordine e grado di scuola.

Dalla seguente tabella si deducono dati relativi all'impianto di ventilazione meccanica controllata presenti nelle due aule e dati per il calcolo della portata (Tabella 2).

Misurazione Portata dell'impianto		
Ubicazione	FALCONARA	RECANATI
Parametri da misurare	Portata griglie unità VMC	Portata su bocchette di mandata e ripresa
Portata dichiarata da progetto [m ³ /h]	1000 m ³ /h (portata alla velocità massima, scheda tecnica)	500 m ³ /h (portata nominale scheda tecnica)
Calcolo portata secondo DM 18/12/75 [m ³ /h]	513,45	332,64
Calcolo portata secondo UNI 10339:1995 [m ³ /h]	475,31	362,88
Tipologia impianto di ventilazione	Decentralizzato	Decentralizzato con unità interna e canali
Unità di trattamento d'aria utilizzata	SCOLARIA 1000	DRU 50-OR (Rocheeggiani)
Tipologia e posizione filtri	ePM1 70% (ISO 16890) - F7 (EN 779)	G3 (ripresa), G3 + F7 (aria esterna)
N° velocità dell'impianto di ventilazione	3	3
Efficienza recuperatore di calore	80,00%	91,10%
Profilo di utilizzo dell'impianto di ventilazione	Non noto	8:20 - 16:20 (velocità non nota)
Dati Monitoraggio		
Data inizio prova	11/05/2023	12/05/2023
Data fine prova	11/05/2023	12/05/2023
Durata complessiva prova	20 minuti	20 minuti
Strumenti di Misura		
Nome strumento	Anemometro TESTO 417	Balometro (ALNOR EBT721)

Tabella 2__Tabella relativa dati di portata dei due impianti nelle scuole

Misurazioni fluidodinamiche: misura della portata del sistema di ventilazione

La misura della portata d'aria erogata dall'impianto di ventilazione è indispensabile per verificare il rispetto dei limiti minimi di portata imposti dalla normativa vigente e per valutare gli effettivi ricambi orari (n) in ambiente. Le norme di riferimento per la determinazione della portata d'aria sono il D.M. 18/12/75 e la UNI 10339. Il D.M. 18/12/75 stabilisce, a seconda del tipo di scuola e di aula, il valore del coefficiente di ricambio d'aria n, espresso in 1/h, per il calcolo della portata d'aria da fornire all'ambiente interessato. Questo coefficiente deve essere moltiplicato per il volume interno del locale per determinare la portata d'aria da fornire secondo la normativa riportata in Tabella 3.

Tipologia Scuola	n [1/h] (DM 18/12/75)
Materna	2,5
Elementare	2,5
Media	3,5
Secondaria di 2° Grado	5
Tipologia Scuola	n _s (UNI 10339)
Materna	0,4
Elementare	0,45
Media	0,45
Secondaria di 2° Grado	0,45
Tipologia Scuola	Q _{op} (UNI 10339)
Materna	4
Elementare	5
Media	6
Secondaria di 2° Grado	7
Norma	Calcolo Portata
DM 18/12/75 (5.3.12.)	$Q=V*n$ (DM 18/12/75)
UNI 10339	$Q=Q_{op} * n_s * A * 3.6$

Tabella 3_Dati utili al calcolo della portata di ventilazione dell'impianto

Di seguito riassunti dati geometrici e portate calcolate secondo DM 18/12/75 e UNI 10339 per le due scuole. Al fine di determinare la portata effettiva dell'impianto è stata presa la portata massima tra le due calcolate (Tabella 4; Tabella 5).

Scuola di Recanati: Le Grazie					
Superficie [m ²]	Altezza [m]	Volume [m ³]	Portata DM 18/12/75	Portata UNI 10339	Portata MAX
44,8	2,97	133,1	332,64	362,88	362,88

Tabella 4_Calcolo portate di ventilazione aula di Recanati

Scuola Falconara Marittima: G. Ferraris

Superficie [m ²]	Altezza [m]	Volume [m ³]	Portata DM 18/12/75	Portata UNI 10339	Portata MAX
48,9	3,00	146,7	513,45	475,31	513,45

Tabella 5_Calcolo portate di ventilazione aula di Falconara

La norma tecnica di riferimento utilizzata per le misurazioni è la EN 12599:2012. Le misure devono essere effettuate per ogni impostazione di velocità disponibile del sistema di ventilazione e devono riguardare sia la portata dell'aria di mandata che quella di estrazione. Le caratteristiche principali e i modelli degli strumenti utilizzati sono riportati nella Tabella 6.

Strumento	Modello	misura	Range	Risoluzione
Anemometro	TESTO 417	Flusso d'aria	0 m ³ /h ÷ 99999 m ³ /h	1 m ³ /h
Balometro	EBT721 Balometro Capture Hood (ALNOR)	Flusso d'aria	42 m ³ /h ÷ 4250 m ³ /h	1 m ³ /h

Tabella 6_Modelli e caratteristiche degli strumenti utilizzati per misurare la portata dei sistemi di ventilazione

A seconda del tipo di impianto, sono stati utilizzati due strumenti diversi per misurare la portata: per le unità di ventilazione installate direttamente all'interno delle aule, è stato utilizzato un anemometro, mentre nel caso della presenza di griglie di mandata/ritorno è stato utilizzato un balometro. L'uso del balometro nel caso di unità di ventilazione installate nelle aule non è mai stato possibile perché le griglie di mandata e di ripresa avevano sempre dimensioni maggiori o diverse rispetto all'area di misurazione del balometro. Quando si utilizza il balometro, questo deve essere posizionato perpendicolarmente alla bocchetta, assicurandosi di coprirlo interamente. Il balometro deve essere posizionato in modo da aderire perfettamente alla superficie che ospita l'ugello e deve essere mantenuto fermo durante la misurazione. Per quanto riguarda l'uso dell'anemometro, occorre considerare diversi punti delle griglie su cui effettuare la misurazione. Dopo aver misurato la portata nei punti interessati, sarà necessario calcolare la media. La misurazione della portata in diversi punti della griglia permette anche di verificare come il flusso d'aria viene fornito dalla macchina di ventilazione, se in modo omogeneo (indipendentemente dal punto considerato) o eterogeneo (ad esempio, i punti laterali potrebbero fornire una portata inferiore rispetto ai punti centrali o viceversa).

Falconara

Nel presente paragrafo è illustrata con delle immagini la scuola di Falconara al fine di comprenderne l'individuazione geografica (Figura 10), l'individuazione dell'aula dalla planimetria (Figura 11) ed altre informazioni geometriche dell'aula (Figura 12, Figura 13).



Figura 10_Vista dall'alto del plesso scolastico G. Ferraris a Falconara

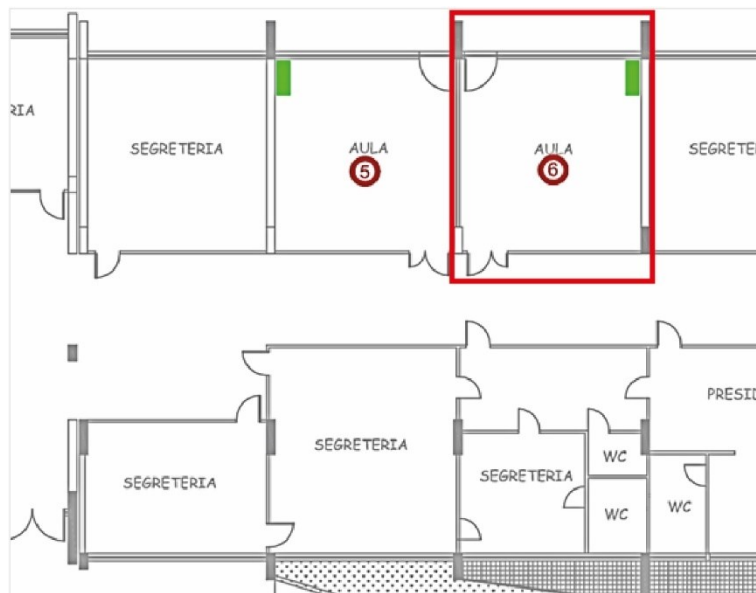


Figura 11_Porzione di planimetria al piano terra della scuola di Falconara che individua l'aula oggetto di studio

L'aula dispone di un impianto delocalizzato della tipologia Scolaria V 1000, è dotata di doppi serramenti per la riduzione dei consumi ed ha una forma quadrata di 48m^2 e 144 m^3 di volume.

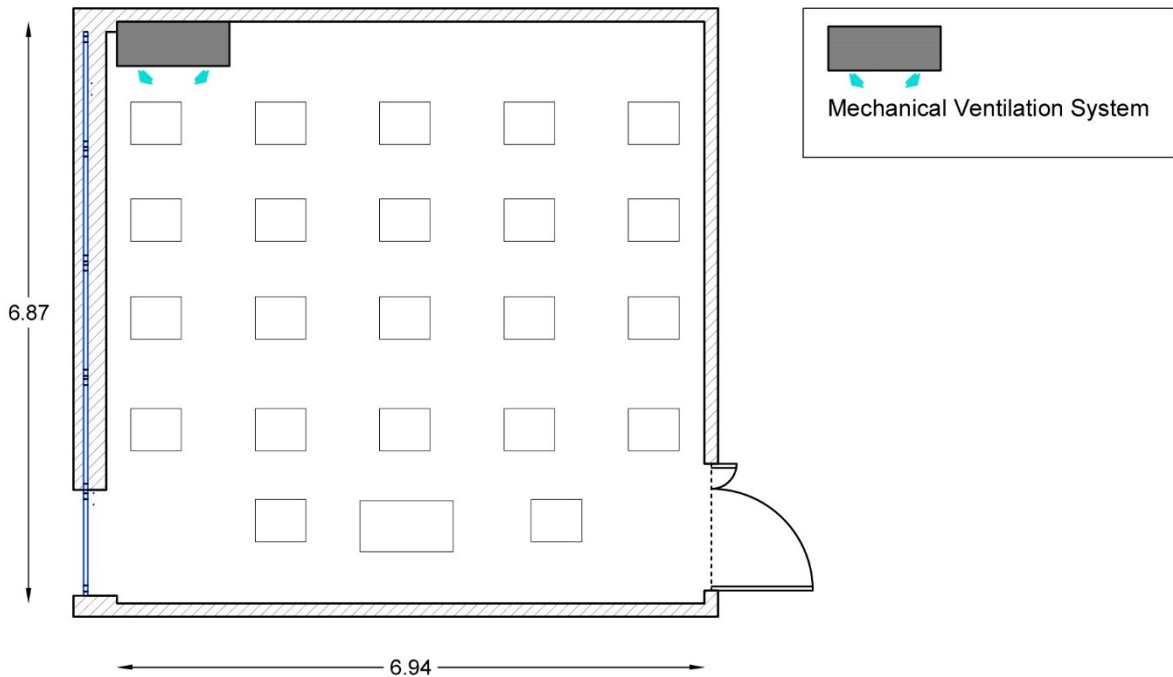


Figura 12_Planimetria dell'aula nella scuola G. Ferraris di Falconara

Come visibile dalla Figura 13 e Figura 14, nell'aula di Falconara sono presenti 4 finestre delle quali una apribile con apertura a vasistas mentre le altre sono bloccate e una portafinestra che si affaccia sui parcheggi al piano terra. Tutte le finestre hanno telaio in alluminio, la superficie finestrata è di $11,11\text{ m}^2$ calcolata come area finestrata/ area della parete opaca su cui insiste la finestra pari al 53%.

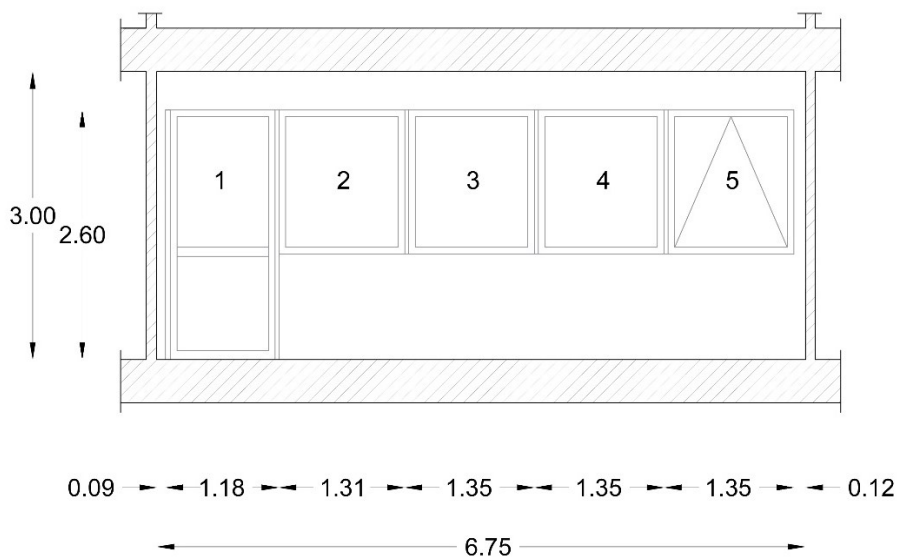


Figura 13_Prospetto della parete finestrata dell'aula della scuola G. Ferraris di Falconara



Figura 14_ Immagine scattata dall'interno dell'aula 6 al piano terra della scuola di Falconara

Recanati

Nel presente paragrafo è illustrata con delle immagini la scuola di Recanati al fine di comprenderne l'individuazione geografica (Figura 15), l'individuazione dell'aula dalla planimetria (Figura 16) ed altre informazioni geometriche dell'aula (Figura 17).



Figura 15_Vista dall'alto del plesso Le Grazie di Recanati



Figura 16_Porzione di planimetria del piano primo della scuola di Recanati che individua l'aula oggetto di studio

L'aula è dotata di impianto di ventilazione meccanica delocalizzato con unità interne e canali posti sul controsoffitto della tipologia DRU 50-OR. La forma dell'aula è quadrata con area di 45 m² e con volume di 135 m³. (Figura 17)

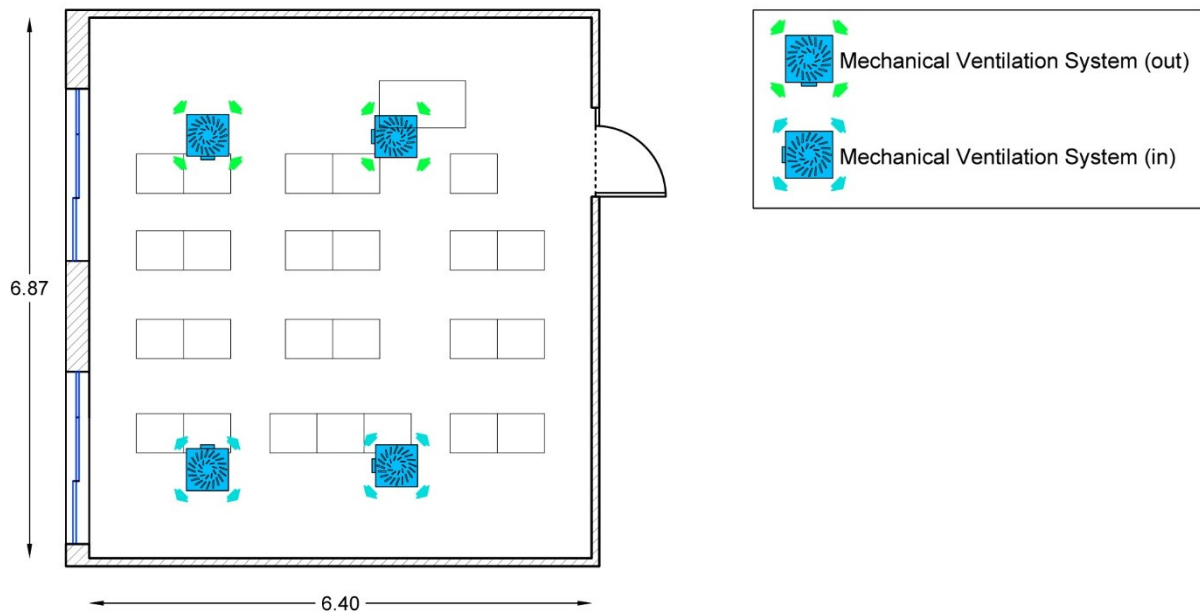


Figura 17 _ Planimetria dell'aula nella scuola Le Grazie di Recanati

Da un primo sopralluogo dell'aula è emerso che le finestre apribili sono la 1, 2, 3 e 4 con apertura scorrevole. Le parti vetrate visibili in Figura 18 e Figura 19 ovvero le ante con estensione verticale adiacenti rispettivamente alla finestra 1 e finestra 3 (WD1 e WD3), sono ante vetrate che non è possibile aprire infatti non presentano nessuna maniglia, così come le ante vetrate ad estensione orizzontale sotto le due finestre WD1, WD2 e WD3, WD4. La superficie finestrata è di 5,6 m² e ha una percentuale finestrata del 28% calcolata come area finestrata/ area superficie parete opaca su cui insiste la finestra. Per tutte le finestre il telaio è in alluminio e il vetro è singolo.

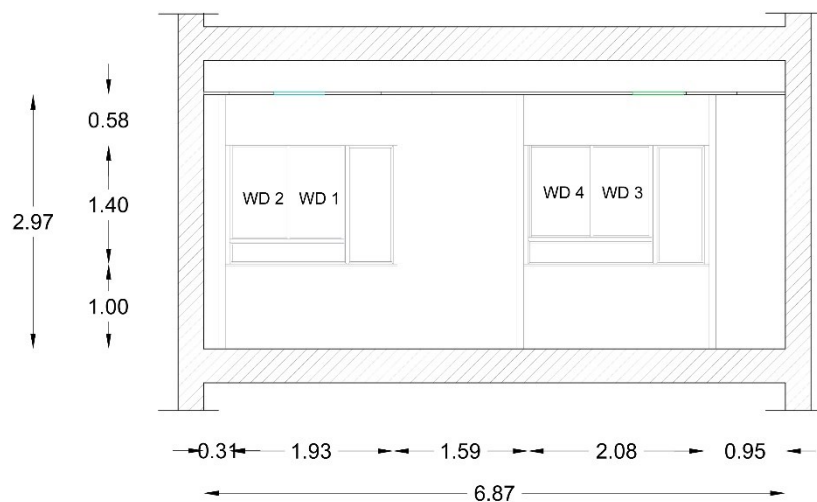


Figura 18 _ Prospetto della parete finestrata dell'aula della scuola Le Grazie di Recanati



Figura 19_Immagine scattata dall'interno dell'aula 10 al piano primo della scuola di Recanati

3.3.2 Analisi sul medio periodo

Per caratterizzare i due casi studio individuati a seguito dell'analisi tipologica anche in termini di parametri microclimatici interni e di concentrazione di anidride carbonica, è stata condotta una campagna sperimentale.

Le misurazioni sono state effettuate all'interno delle due aule rispettivamente una a Recanati e una a Falconara delle quali si è discusso al capitolo 3.3.1 Generalità dei due casi studio. Le misure delle variabili climatiche sono state acquisite dalle stazioni meteorologiche più vicine ovvero temperature e livelli di CO₂ esterni.

Misurazioni termiche e IAQ

Durante i test sono stati misurati i parametri principali per il comfort e la qualità dell'aria, ovvero la temperatura dell'aria interna, l'umidità relativa e la concentrazione di CO₂. La qualità dell'aria interna in un ambiente confinato dipende da vari tipi di indicatori e inquinanti. Il principale indicatore utilizzato per determinare la qualità dell'aria è l'anidride carbonica, perché è facile da misurare rispetto ad altri inquinanti. Negli ambienti scolastici, la principale fonte di emissioni di CO₂ sono gli utenti. Un livello elevato di CO₂ può causare mal di testa, sonnolenza e difficoltà di concentrazione[57]. Per la misurazione della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa è stata utilizzata la norma EN ISO 7726:2002 [58], mentre per la misurazione della CO₂ è stata utilizzata la norma EN ISO 16000-26:2012 [59]. I valori limite di riferimento considerati per i parametri misurati, nel caso degli edifici scolastici, sono quelli indicati nella normativa italiana DM 18/12/75 [55] e nella norma tecnica EN 16798-1:2019 [60], riassunti nella Tabella 7.

Dato	Normativa di riferimento	Limiti da Normativa di riferimento	Valori limite
Temperatura dell'aria	EN ISO 7726:2002	DM 18/12/75	20 ± 2°C
		EN 16798-1:2019	T _{op, min} = 19°C T _{op, max} =27°C
Umidità relativa	EN ISO 7726:2002	DM 18/12/75	45-55%
		EN 16798-1:2019	35-65%
CO ₂	EN ISO 16000-26:2012	EN 16798-1:2019	1350 ppm
ΔCO ₂ i-e		ASHRAE 62:2001	460 ppm

Tabella 7_Normative di riferimento per misurazioni e limiti di variabili indoor

La misurazione delle variabili elencate è stata effettuata utilizzando un data logger dotato di un sensore di CO₂ auto calibrante a infrarossi non dispersivi (NDIR), integrato con sensori di temperatura e umidità relativa (Figura 20). Le caratteristiche principali sono riportate nella Tabella 8.

Sensore	Modello	Sistema di acquisizione	Misura	Range	Accuratezza
Data logger	HOBO MX1102A	Internal Logger	Temperatura dell'aria	0°C ÷ + 50°C	± 0.21°C
			Umidità Relativa	1% ÷ 90%	± 2-6%
			CO ₂	0 ÷ 5000 ppm	± 50 ppm

Tabella 8_Caratteristiche del data logger utilizzato per monitorare le variabili indoor

I dati sono stati memorizzati ogni minuto e i sensori sono stati installati a un'altezza compresa tra 1,80 m e 2,00 m dal suolo. Nello studio di Muelas et al. [61], infatti, si dimostra che fino a 2,20 m i valori campionati sono congruenti con i valori medi misurati all'interno dell'aula. Il monitoraggio deve fornire una serie di dati continui; si raccomanda un intervallo di campionamento di almeno 1 minuto e un periodo di monitoraggio di almeno due settimane. Ricordiamo che la temperatura dell'aria interna, l'umidità relativa e la concentrazione di CO₂ sono influenzate da molti parametri, tra cui: il numero di persone presenti nell'aula e l'attività da esse svolta, il profilo di accensione del sistema di ventilazione e riscaldamento, l'eventuale apertura e chiusura delle finestre. Per una corretta valutazione dei parametri misurati, questi aspetti devono essere noti. Deve essere richiesto il profilo di accensione degli impianti, come il numero di utenti nelle aule. Per l'apertura/chiusura delle finestre, si raccomanda l'installazione di appositi sensori che ne segnalino il profilo di utilizzo. Sovrapponendo questi dati sarà possibile ottenere una valutazione accurata delle variabili studiate.

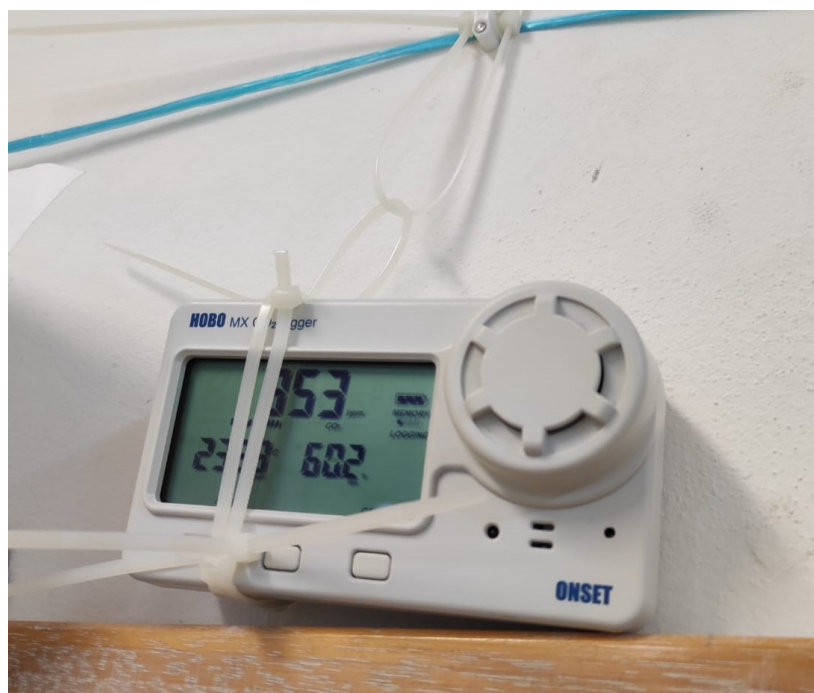


Figura 20_Hobo posizionato nell'aula di Falconara

Misurazione Temperatura - Umidità Relativa - CO₂

Ubicazione	FALCONARA	RECANATI
Parametri da misurare	Temperatura aria interna, umidità relativa interna, CO ₂	Temperatura aria interna, umidità relativa interna, CO ₂
Profilo di occupazione dell'aula	Non noto	Non noto
Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento	Non noto	Non noto
Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione	Non noto	8:20 - 16:20 (velocità non nota)
Apertura delle finestre	Non nota	Non nota
Dati Monitoraggio		
Data inizio prova	11/05/2023	12/05/2023
Data fine prova	29/05/2023	30/05/2023
Durata complessiva prova	18 giorni	17 giorni
Intervallo di acquisizione dei dati	1 minuto	1 minuto
Strumenti di Misura		
Nome strumento	Acquisitore di temperatura, umidità, CO ₂ (Hobo)	Acquisitore di temperatura, umidità, CO ₂ (Hobo)
Altezza installazione	1.90 m	1.90 m

Tabella 9 _ Tabella relativa a misurazioni di temperatura, umidità relativa e CO₂ nelle due scuole

In questa analisi, lo strumento (Hobo) acquisisce l'umidità relativa, la temperatura e la CO₂ in due settimane circa in modo continuativo, ciò vuol dire che è stato possibile rilevare questi dati con un intervallo di acquisizione di un minuto sia di giorno che di notte, quindi si è valutato l'andamento di temperatura e CO₂ per tutta la durata della giornata sia quando gli alunni sono in classe durante lo svolgimento delle lezioni, sia quando c'è la ricreazione che quando gli alunni non ci sono.

Sebbene le prove comprendano un intervallo di tempo maggiore di due settimane, dato che i primi giorni sono stati di settaggio dello strumento, sono stati considerati, ai fini della presente valutazione degli andamenti dei dati di temperatura e CO₂ di sole due settimane dal lunedì alla domenica.

In particolare, considerando che l'intervallo di prova va dall'11 al 29 maggio 2023 e dal 12 al 30 maggio 2023 rispettivamente per Falconara e Recanati, sono stati scartati tutti i giorni fino al 14 compreso in quanto, come detto prima, sono giorni utili per settare lo strumento all'interno delle aule in base alle condizioni interne ad esse. Inoltre, sono state scelte due settimane comuni ad entrambe le scuole.

Ulteriori informazioni dedotte dalle scuole stesse e prese in considerazione al fine di analizzare al meglio i dati acquisiti e comprendere quali sarebbero stati i giorni da analizzare sono descritte nel seguito.

Per la scuola di Falconara:

-Orario scolastico: 8:00-13:45 dal lunedì al venerdì + sabato 20 maggio

-Giorni esclusi: martedì 16 maggio, domenica 21 maggio

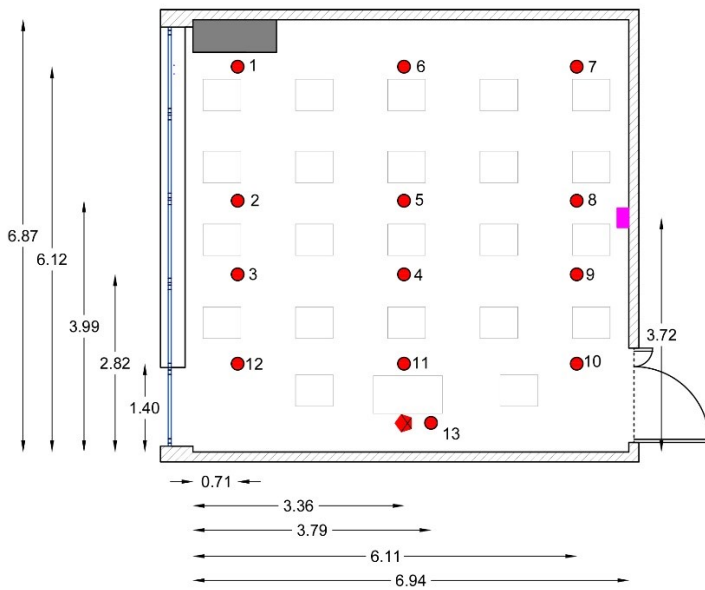
Per la scuola di Recanati:

-Orario scolastico: 8:20-16:20 dal lunedì al venerdì, dalle 12.20 alle 14 gli alunni effettuano una pausa per recarsi alla mensa.

-Giorni esclusi: sabato 20 maggio, domenica 21 maggio

Non sono indicate informazioni relative alle ricreazioni di entrambe le scuole, questo dato in seguito verrà ipotizzato in base ai livelli di CO₂ reperiti e dati di sensori che illustrano le abitudini degli studenti come descritto nel capitolo

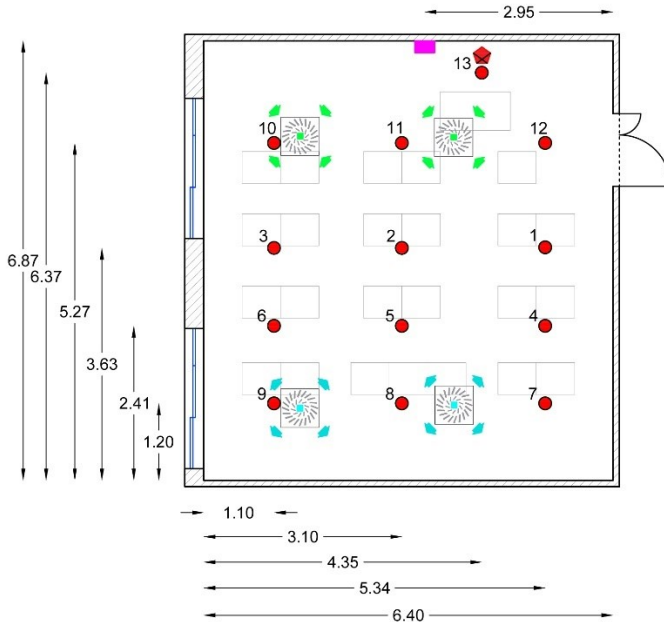
Falconara



- Dantec (h= 0.2m/0.6m/1.10m):
 - Air velocity (m/s)
 - Air temperature (°C)
 - Relative humidity (%)
 - Operative temperature (°C) (h=0.70m)
 - Draught rate index (-)
 - Turbulence (-)
 - PMV (-) ("met" e "clo" pre-set)
 - PPD (-)"met" e "clo" pre-set)
- Hobo (h=1.9m):
 - Air temperature (°C)
 - Relative humidity (%)
 - CO2
- ◆ Thermal manikin (in 27 zones):
 - Skin temperature (°C)
 - Heat flux (W/m2)
 - Equivalent temperature (°C)
 - PMV (-)
 - PPD (-)
 - Clo

Figura 21_Planimetria aula di Falconara con individuazione e posizionamento di tutti gli strumenti di misura utilizzati per le analisi

Recanati



- Dantec (h= 0.1m/0.6m/1.10m):
 - Air velocity (m/s)
 - Air temperature (°C)
 - Relative humidity (%)
 - Operative temperature (°C) (h=0.70m)
 - Draught rate index (-)
 - Turbulence (-)
 - PMV (-) ("met" e "clo" pre-set)
 - PPD (-)"met" e "clo" pre-set)
- Hobo (h=1.9m):
 - Air temperature (°C)
 - Relative humidity (%)
 - CO2
- ◆ Thermal manikin (in 27 zones):
 - Skin temperature (°C)
 - Heat flux (W/m2)
 - Equivalent temperature (°C)
 - PMV
 - PPD
 - Clo

Figura 22_Planimetria aula di Recanati con individuazione e posizionamento di tutti gli strumenti di misura utilizzati per le analisi

3.3.3 Analisi comportamento utente

Nel presente capitolo sono illustrate le metodologie di acquisizione di dati relativi al comportamento degli utenti che occupano le aule di Falconara e Recanati al fine di comprendere le abitudini degli stessi e l'orario in cui gli studenti fanno ricreazione o aprono le finestre.

Falconara

I dati relativi ai sensori di apertura e chiusura porta e finestre riguardano l'aula 4 al piano primo della scuola di Falconara e derivano da acquisizioni effettuate in un precedente lavoro di ricerca nella medesima scuola. Come detto, l'aula è diversa rispetto alle prove di cui si è discusso in precedenza che hanno permesso l'acquisizione di dati attraverso l'Hobo (aula 6 al piano terra). Nonostante ciò, si è comunque deciso di utilizzare tali dati per comprendere se l'orario di ricreazione stabilito potesse essere corretto e per capire le abitudini degli utenti ovvero la frequenza con cui le finestre sono state aperte per escludere eventuali problematiche di ricircolo dell'aria.

Si precisa inoltre che l'anno di acquisizione dei dati è lo stesso rispetto alle prove effettuate con l'Hobo per le analisi sul medio periodo quindi il 2023 ma in mesi diversi. I dati dei sensori sono infatti riferiti al mese di marzo 2023 mentre quelli sul medio periodo, effettuati con i dati dell'Hobo, fanno riferimento al mese di maggio 2023. Nonostante la divergenza temporale i dati sono stati presi in considerazione perché utili alla comprensione del periodo di ricreazione tenendo presente che gli studenti frequentano le lezioni dalle 8:00 alle 13:45.

I giorni esaminati sono in totale 5 e vanno dal 15 marzo 2023 al 21 marzo 2023. Per ogni giornata scolastica, esclusi quindi il sabato e la domenica, sono stati ricavati dati dai sensori di apertura porta e finestre e dati dell'Hobo installato nell'aula. L'Hobo registra temperatura, umidità relativa e anidride carbonica con un intervallo di acquisizione di 5 minuti mentre i sensori su porta e finestre registrano apertura e chiusura restituendo rispettivamente "on" e "off" con un intervallo di acquisizione ogni minuto. In questo caso, i dati sono stati acquisiti ogni 5 minuti e non ogni minuto come per Recanati, nello specifico, per fare ciò sono stati presi tutti i dati registrati dall'Hobo mentre quelli dei sensori sono stati filtrati prendendo un dato ogni 5 valori. I dati di Hobo e sensori sugli infissi fanno riferimento allo stesso orario di settaggio.

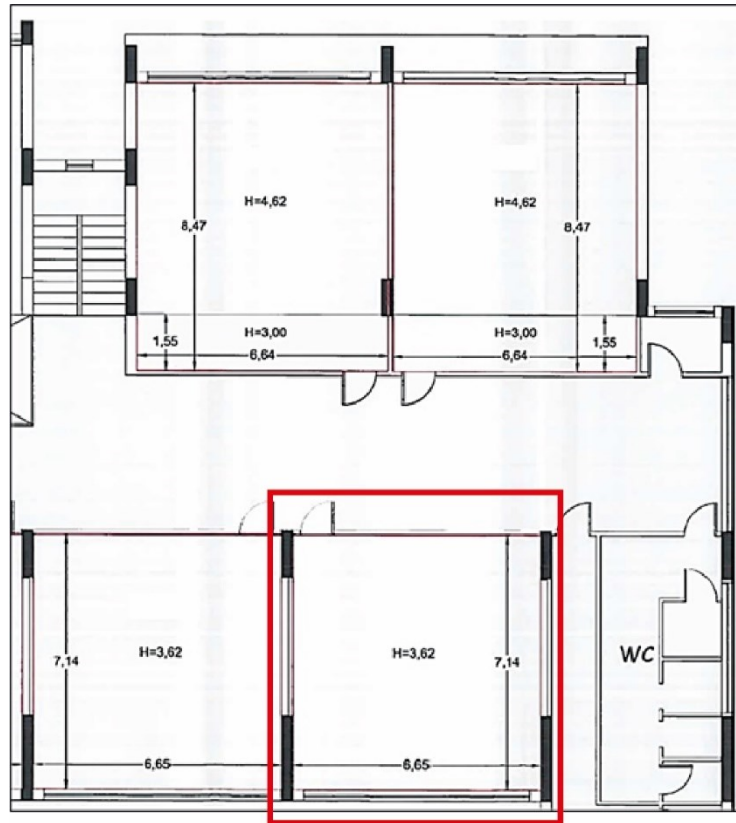


Figura 23_Porzione di planimetria al piano primo della scuola di Falconara con individuazione aula studiata per indagare il comportamento degli utenti

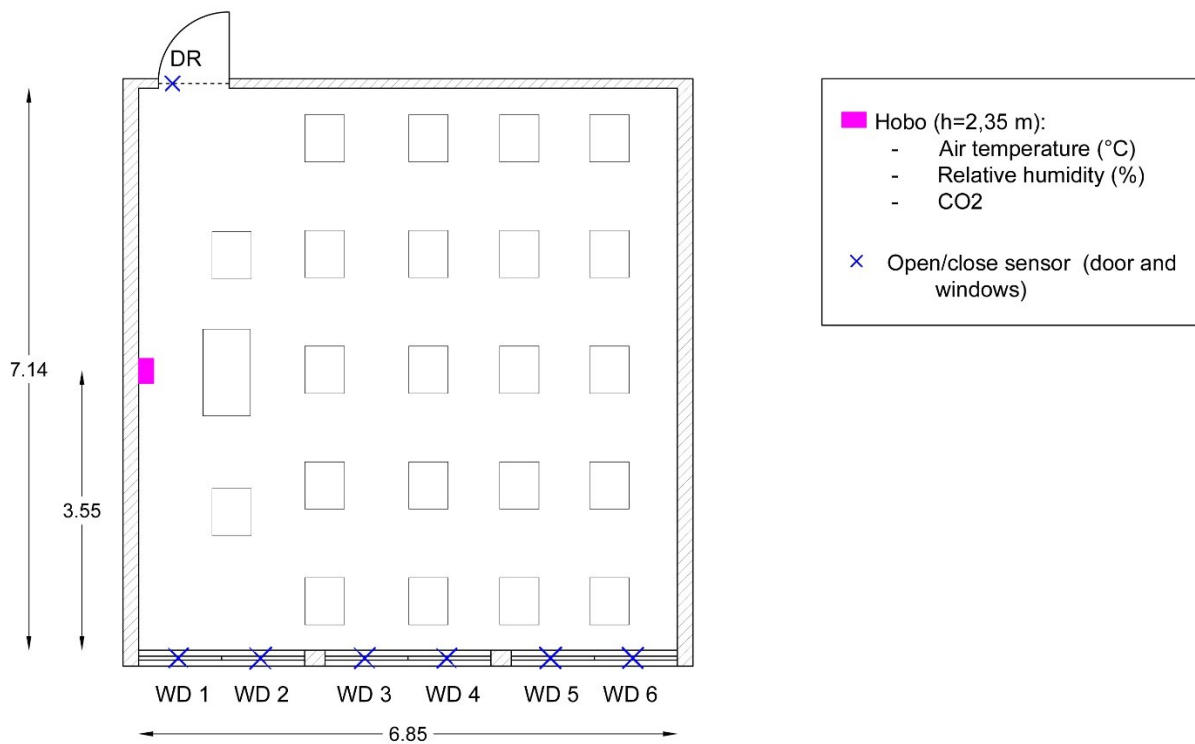


Figura 24_Aula della scuola di Falconara G. Ferraris al piano primo dove sono stati installati i sensori di apertura e chiusura porta e finestre e Hobo

Come si può notare dalla Figura 24, l'aula al piano primo presa in esame nella scuola di Falconara ha circa le medesime dimensioni di quella di cui si è discusso in precedenza. In questa aula sono stati installati 7 sensori che permettono di capire se gli infissi sono aperti o chiusi uno di questi sulla porta d'ingresso dell'aula e gli altri su ogni anta delle finestre dal momento che l'aula presenta 3 finestre apribili sia a vasistas che a battente come si nota dalla Figura 26. Inoltre, nell'aula è presente un'Hobo.

I sensori installati su porte e finestre (chiamati WD e DR nel seguito) hanno la peculiarità di permettere di conoscere lo stato (aperto o chiuso) dell'infisso su cui sono installati, la temperatura e luminosità dell'ambiente verso il quale si affacciano. Sono stati posizionati sul telaio superiore delle sei finestre presenti nell'aula e sulla porta d'ingresso della classe, inoltre conoscere tali dati aiuta a capire le abitudini degli occupanti. (Figura 25)



Figura 25_Sensori di presenza installati a Falconara



Figura 26_Foto scattata in situ degli infissi nell'aula al piano primo della scuola di Falconara

Recanati

I dati relativi alla scuola di Recanati, per quanto riguarda lo studio di apertura e chiusura di porta e finestre fanno riferimento al periodo che va dall'8 al 15 maggio 2024 per un totale di 6 giorni esaminati ed esclusi il sabato e la domenica. Si precisa che i dati di quest'analisi fanno riferimento all'anno scolastico corrente mentre nel capitolo 3.3.2 **Analisi sul medio periodo**, si faceva riferimento a dati acquisiti nel mese di maggio 2023. Nonostante questa divergenza di un anno, è stato deciso di prendere in considerazione tali dati perché l'orario didattico non è variato a distanza di un anno quindi si considera un periodo di lezioni che va dall'ingresso alle 8:20 alle 12:20 e nel pomeriggio dalle 14:00 alle 16:20. Inoltre, questi dati sono utili per capire quando gli alunni fanno ricreazione e la frequenza di apertura delle finestre così come per la scuola di Falconara.

L'aula didattica sulla quale sono stati installati i sensori è la numero 10 e si trova al piano primo del plesso scolastico di Recanati; di seguito la Figura 28_ Aula della scuola di Recanati Le Grazie dove sono stati installati i sensori di apertura e chiusura porta e finestre, Hobo. Figura 28 illustra i sensori di acquisizione dei dati posti all'interno dell'aula 10 a Recanati. Sono presenti 3 Hobo che acquisiscono temperatura, umidità relativa e CO₂, un sensore di presenza che indica la presenza di utenti nell'aula, 5 sensori di apertura e chiusura porta e finestre. Si precisa che le sole finestre apribili sono la numero 2 e 4 infatti le altre due 1 e 3 rimangono sempre chiuse in quanto sono finestre non apribili manualmente e questo dato è visibile anche nei grafici dei risultati in cui sono illustrati i soli andamenti delle due finestre apribili in quanto per le altre due finestre i due sensori posti su di esse hanno sempre registrato lo stato "off" di chiusura. Infatti, i sensori di apertura porta e finestre restituiscono come dato la dicitura "on" quando le finestre sono aperte e "off" quando sono chiuse come detto nel paragrafo sopra per la scuola di Falconara.

Per quanto riguarda i dati acquisiti dalle 3 Hobo, sono stati utilizzati soltanto la temperatura e l'anidride carbonica e per entrambi i dati è stata fatta la media sui dati registrati dai 3 strumenti. Tutti i sensori di apertura e le Hobo hanno un intervallo di acquisizione ogni minuto.

Il people counter è uno strumento che permette di contare le persone in entrata e uscita (di conseguenza quelle presenti all'interno della stanza), tenere in memoria l'ultima direzione rilevata e segnalare il movimento o stazionarietà dei passanti. L'altezza per la sua installazione è stata scelta tenendo in considerazione che la statura media degli occupanti, risulta essere circa 1,60 m. (Figura 27)



Figura 27_ Sensore people counter installato a Falconara

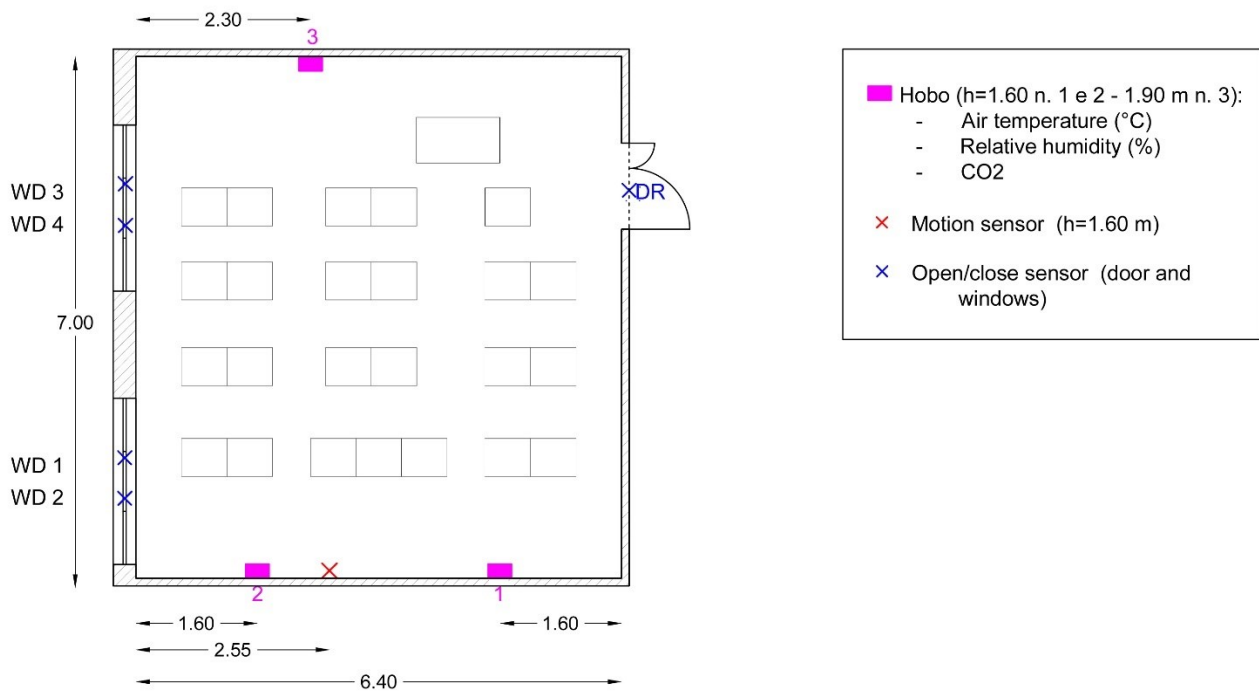


Figura 28_ Aula della scuola di Recanati Le Grazie dove sono stati installati i sensori di apertura e chiusura porta e finestre, Hobo e people counter

3.3.4 Analisi microclimatica

L'IEQ è caratterizzato da quattro domini del comfort: benessere respiratorio (IAQ), benessere termoisometrico, benessere visivo e benessere acustico.

Tratteremo ora il benessere termoisometrico dal punto di vista dei dati da considerare per le analisi.

Il benessere termico è definito come una condizione mentale (psicofisica) di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico. L'insoddisfazione può essere causata da: disagio per il caldo o per il freddo che prova il corpo nel suo complesso, non desiderato raffreddamento (o riscaldamento) di una particolare parte del corpo (es. da corrente d'aria), differenza verticale di temperatura tra testa e caviglie troppo elevata, pavimento troppo caldo o freddo, asimmetria della temperatura radiante troppo elevata, un'energia metabolica troppo elevata, abbigliamento non adeguato.

Le variabili principali che influenzano il benessere termico sono: la temperatura a bulbo secco dell'aria, la temperatura media radiante, l'umidità dell'aria, la velocità media relativa dell'aria, il benessere termico, l'attività fisica svolta, la resistenza termica del vestiario indossato.

Temperatura media radiante

Gli scambi per irraggiamento sono la base per calcolare la temperatura media radiante (T_{mr}): la T_{mr} è la temperatura fittizia che, se tutto l'involucro avesse uniformemente darebbe luogo allo scambio per irraggiamento che avviene nella realtà. Lo scambio per irraggiamento, si ricava conoscendo temperatura superficiale T_{ce} , l'emissività della persona ϵ_p (circa 0,98) e la sua area efficace radiante A_{eff} . Noti i fattori di vista (F_{p-i}) fra la persona e le superfici dell'involucro alla temperatura T_i (K), lo scambio termico per irraggiamento è dato da (Figura 29).

$$q_{rad} = A_{eff} \epsilon_p \sigma \left[\sum F_{p-i} T_i^4 - T_{ce}^4 \right]$$
$$T_{mr}^4 = \sum_i F_{p-i} T_i^4$$

Figura 29 _scambio termico per irraggiamento

Temperatura Operativa

È la temperatura uniforme di una cavità in cui il soggetto scambierebbe per convezione e irraggiamento la stessa energia che effettivamente scambia nell'ambiente reale non uniforme. Numericamente è la media pesata della temperatura dell'aria (T_a) e di quella media radiante (T_{mr}), in cui le conduttanze unitarie radiative (abiti-superfici) e convettive (abiti-aria) costituiscono i coefficienti di peso.

$$T_o = \alpha_c T_a + \alpha_r T_{mr} / (\alpha_r + \alpha_c)$$

Nel caso in cui i due coefficienti siano molto prossimi l'uno all'altro si possano considerare uguali, si ha: $T_o = (T_a + T_{mr}) / 2$

Indici Comfort termico globale

Il D.Lgs 81/08, norma gli ambienti di lavoro sotto il profilo dei requisiti che devono essere rispettati, tra cui, il microclima. La verifica del rispetto dei requisiti sul microclima si compie a mezzo di una valutazione sul comfort termico, valutazione basata sul calcolo di sei indici adimensionali, due espressioni del comfort termico globale (PMV e PPD) e quattro espressioni del discomfort termico locale (DR e tre diversi PD cioè differenza di temperatura verticale, pavimenti caldi o freddi ed asimmetria radiante), dove con comfort globale si intende quello percepito dalla persona nella sua interezza e con discomfort locale si intende quello percepito in parti localizzate del corpo. Il valore dell'indice che identifica ogni disagio locale rappresenta la percentuale di persone infastidite.

Gli indici di comfort termico globale esprimono la risposta media di un grande numero di soggetti. L'indice attualmente più adottato è il PMV (dall'inglese Predicted Mean Vote, Voto Medio Previsto), proposto da Fanger e adottato dalla norma UNI-EN-ISO 7730, che è funzione delle sei variabili indipendenti (attività svolta, vestiario, temperatura dell'aria, temperatura media radiante velocità dell'aria e umidità relativa) e che è definito sulla scala a 7 valori che vanno da +3 molto caldo a -3 molto freddo e lo zero è la condizione di neutralità.

$$PMV = f(M, I_{cl}, t_a, t_r, v_a, \Phi)$$

Il PMV è la sensazione termica avvertita in un dato ambiente da un individuo dotato di media sensibilità.

La norma UNI EN ISO 7730 per individuare un ambiente in Classe A richiede un PMV compreso tra $-0,2 < PMV < 0,2$.

Per un ambiente in Classe B prevede un PMV tra $-0,5 < PMV < 0,5$ e per un ambiente in Classe C un PMV tra $-0,7 < PMV < +0,7$.

Il PMV prevede il valore medio dei voti di sensazione termica espressi da un gran numero di persone esposte allo stesso ambiente; i voti individuali sono quindi dispersi intorno a questo valore medio.

Per prevedere il numero di persone che hanno una sensazione non confortevole di caldo o di freddo è possibile calcolare la percentuale prevista di insoddisfatti (PPD).

Statisticamente anche con PMV prossimi allo zero si avrà una piccola percentuale di insoddisfatti pari a circa il 5% di soggetti.

La UNI EN ISO 7730 prescrive un PPD massimo del 10%, ai limiti dell'intervallo di benessere, con PMV tra $-0,5 < PMV < 0,5$ che corrisponde alla Classe B.

Draught Rate: indice del discomfort termico locale

Il disagio da correnti d'aria è uno dei quattro discomfort locali, valutato attraverso l'indice denominato DR (Draught Rate).

Il valore di questo parametro dipende dalla temperatura, dalla velocità e dalla turbolenza dell'aria nel punto in cui si valuta il disagio e aumenta all'aumentare della velocità e della turbolenza e al diminuire della temperatura. L'aria a temperatura più bassa, a parità di velocità e turbolenza, procura quindi un disagio maggiore; così come l'aria con elevata turbolenza, ovvero costituita da flussi caotici, a parità di temperatura e velocità, procura un disagio maggiore di un flusso d'aria uniforme.[3]

Il disagio da correnti d'aria (indice DR) è calcolato tramite la formula in Figura 30.

$$DR = (34 - t_{a,l})(\bar{v}_{a,l} - 0.05)^{0.62} (0.37 \times \bar{v}_{a,l} \times Tu + 3.14)$$

Figura 30_Formula Draught Rate

dove:

$t_{a,l}$ è la temperatura dell'aria, in gradi Celsius, compresa tra 20 °C e 26 °C;

$\bar{v}_{a,l}$ è la velocità media locale dell'aria, in metri al secondo, < 0.5 m/s;

Tu è l'intensità locale di turbolenza, in percentuale, compresa tra il 10% e il 60%.

L'analisi microclimatica sulle aule delle due scuole è stata effettuata creando per ognuna di esse una rete di punti di presa in modo da mappare gran parte dell'aula per capire se ci sono eventuali variazioni nei dati acquisiti e comprendere il microclima interno dell'aula. E' importante precisare che tale analisi è stata fatta ad impianto di ventilazione acceso in modo da comprendere eventuali criticità degli impianti di ventilazione ed ottenere così un confronto tra essi dato che a Falconara è delocalizzato con unità interna all'aula e a Recanati è delocalizzato con unità e canali interni posti sul controsoffitto.

Progetto di Monitoraggio nelle due aule

Nel seguito sono riportate le planimetrie delle due aule con i 13 punti di presa dove la Dantec ha effettuato le acquisizioni per ogni posizione a 3 altezze diverse (10 cm; 60 cm e 110 cm), come si può notare i punti di presa creano una mappatura dell'intera aula in modo tale da ottenere risultati estesi su tutta l'area calpestabile e capire quali zone sono di maggior comfort per gli utenti. Per entrambe le scuole i punti dall'1 al 12 acquisiscono dati nelle stesse postazioni in cui normalmente sono presenti gli alunni quindi verosimilmente i dati ricavati rappresentano le condizioni microclimatiche che l'utente percepisce. Il punto 13 invece è rappresentativo della posizione dell'insegnante, infatti, è situato dietro la cattedra. (Figura 31 e Figura 32)

Tutte le misurazioni effettuate nei punti da 1 a 12 sono ad impianto acceso e finestre e porta chiuse mentre la postazione 13 sia a finestre e porta chiusi che finestre aperte e porta chiusa. Le misurazioni sono state eseguite in periodi diversi ovvero a maggio e luglio in quanto non è stato possibile effettuare tutte le misure in un unico mese data la mole di tempo impiegata per ogni misurazione di presa. Più nello specifico a Falconara sono stati acquisiti dati sulle prime 9 stazioni nel mese di maggio mentre le ultime 4 stazioni nel mese di luglio, mentre a Recanati i primi 6 punti a maggio e gli altri 7 punti a giugno. Per quanto riguarda l'analisi microclimatica trattata nel presente capitolo, i dati presi in considerazione sono quelli del mese di maggio in quanto per Falconara sono la maggioranza dei punti acquisiti ovvero fino al 9 mentre per Recanati sono solo 6 punti ma riescono a mappare la zona centrale dell'aula tra le bocchette di mandata e ripresa. Unica eccezione viene fatta per la velocità dell'aria registrata con la Dantec per la quale vengono presi in considerazione tutti i punti di acquisizione.

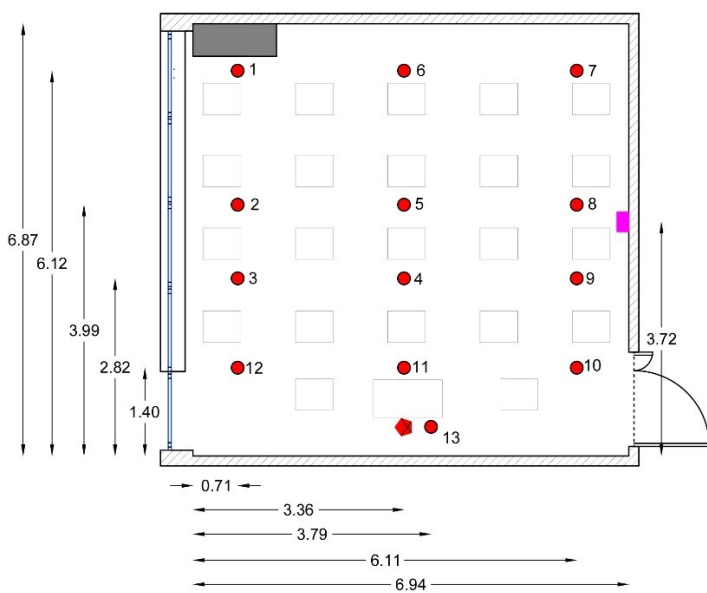


Figura 31_Planimetria con individuazione punti di presa dei sensori nell'aula di Falconara

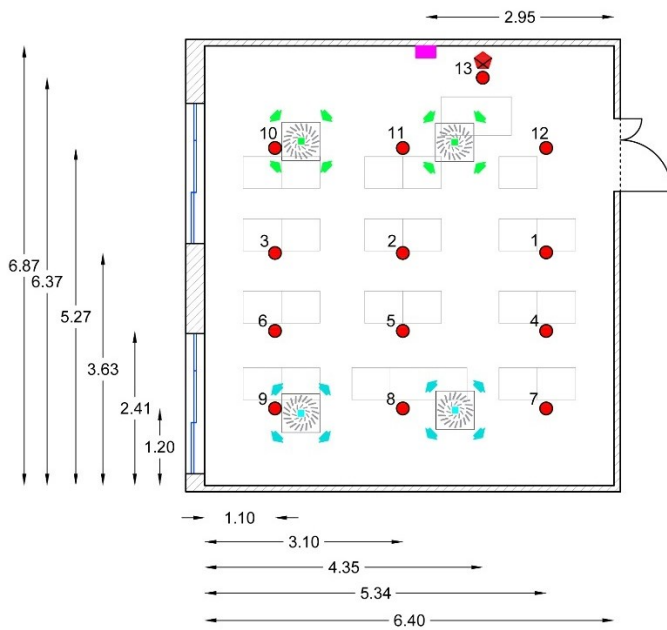


Figura 32_Planimetria con individuazione punti di presa dei sensori nell'aula di Recanati



Figura 33_Dantec nella scuola di Falconara in due postazioni distinte



Figura 34_Dantec nell'aula di Recanati

Specifiche tecniche dello strumento di misurazione utilizzato

Lo strumento utilizzato per acquisire dati nelle due aule è il COMFORT SENSE, della DANTEC Dynamics è progettato per effettuare indagini sul comfort termico in ambienti chiusi, quando sono necessarie misurazioni accurate. Inoltre, il suo impiego è fondamentale per la ricerca e lo sviluppo di sistemi di riscaldamento e condizionamento dell'aria che richiedono misurazioni multipunto della velocità e della temperatura dell'aria, umidità e temperatura operativa. Il ComfortSense è dotato di sensori omnidirezionali con una risposta in frequenza di 2 Hz per ottenere misurazioni del tiraggio, e sonde ad alta velocità per condotti di ventilazione o altre strutture di prova. I parametri ambientali che il sistema ComfortSense è in grado di misurare sono:

- Velocità dell'aria;
- Temperatura dell'aria;
- Temperatura operativa;
- Umidità relativa;
- Draugh rate;
- Turbolenza.

Inoltre, possono essere valutati parametri statistici in accordo con gli standard ASHRAE 55 e UNI EN ISO 7730, essi sono:

- Il voto medio previsto (PMV);
- La percentuale prevista di insoddisfatti (PPD).

La sonda ad alta velocità è in grado di misurare velocità dell'aria fino a 30 m/s e temperature dell'aria in un intervallo da -20°C a +80°C, e la forma ellittica della sonda di temperatura operativa consente di simulare la presenza di persone sdraiate, sedute o in piedi attraverso l'inclinazione della sonda in tre diverse posizioni: orizzontale, 45 gradi o verticale. In questa sperimentazione il globo termometro che acquisisce la temperatura operativa è a 45° perché simula l'utente in posizione seduta.

Le sonde che rilevano velocità dell'aria, temperatura dell'aria, draugh rate e turbolenza sono poste a 3 altezze: 10 cm, 60 cm e 110 cm da terra per acquisire dati alle 3 altezze tipiche del corpo umano se fosse in posizione seduta ovvero caviglie, anche e capo.

Per quanto concerne il montaggio la casa madre mette a disposizione un treppiede o l'integrazione in manichini termici. La Dantec Dynamics mette a disposizione del professionista un software di facile utilizzo che consente l'impostazione di una sequenza di misurazione e di una griglia di misurazione in cui è possibile per l'utente scegliere tra una selezione accurata di 65 sonde presenti nella libreria messa a disposizione. I risultati statistici estrapolabili dal software sono forniti sotto forma di tabelle, grafici o file compatibili con Excel, sulla base di cicli di monitoraggio impostati dall'utente. Sono inoltre disponibili grafici avanzati come "Grafici di contorno 3D", i quali offrono all'utilizzatore una panoramica completa dei dati monitorati. In tal senso, è quindi possibile identificare le cosiddette "zone problematiche" all'interno dell'ambiente oggetto di indagine. Infine, il software ComfortSense è in grado di mostrare la percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) in base alla velocità dell'aria, alla temperatura operativa e all'umidità misurati in funzione del voto medio previsto (PMV). Per la

definizione di quest'ultimi, sono presi in considerazione anche il tasso metabolico specificato (MET) e l'isolamento degli indumenti (CLO). Le potenzialità che il sistema ComfortSense è in grado di offrire al ricercatore sono molteplici, e in un contesto come quello odierno dove il comfort termico e la risoluzione dei problemi legati ad esso ricoprono un ruolo cruciale, allora la sua applicazione appare subito fondamentale. Infatti, l'apparecchio, se correttamente impiegato permette di ottenere una valutazione accurata del comfort termico dell'ambiente oggetto di studio. I risultati ottenuti e il modo in cui essi vengono forniti costituiscono una base valida per future discussioni sull'accettabilità del comfort termico interno. Di seguito si riportano le specifiche tecniche del sistema ComfortSense utilizzato per l'analisi microclimatica.

Dati Dantec		
Ubicazione	FALCONARA	RECANATI
Parametri da misurare	Temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità dell'aria, draught rate, turbolenza, temperatura operativa, PPD, PMV	Temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità dell'aria, draught rate, turbolenza, temperatura operativa, PPD, PMV
Numero punti considerati	13 (12 aula + 1 cattedra)	13 (12 aula + 1 cattedra)
Posizione punti considerati	Riportati in Figura 21	Riportati in Figura 22
Condizioni di svolgimento della prova	Impianto di ventilazione a velocità 2, finestre e porta chiuse. OW: Impianto di ventilazione a velocità 2, finestre aperte e porta chiusa	Impianto di ventilazione a velocità 3, finestre e porta chiusa. OW: Impianto di ventilazione a velocità 3, finestre aperte e porta chiusa
Dati Monitoraggio		
Data inizio prova	11/05/2023 (9 punti) - 5/07/2023 (3 punti + 3 punti OW)	12/05/2023 (6 punti) - 19/06/2023 (6 punti + 3 punti OW)
Data fine prova	11/05/2023 (9 punti) - 5/07/2023 (3 punti + 3 punti OW)	12/05/2023 (6 punti) - 19/06/2023 (6 punti + 3 punti OW)
Durata complessiva prova	2 ore (10 minuti per postazione)	2 ore (10 minuti per postazione)
Altezza sensori	207: 10 cm; 205: 60 cm; 204: 110 cm	207: 10 cm; 205: 60 cm; 204: 110 cm
Strumenti di Misura		
Nome strumento	ComfortSense (DANTEC)	ComfortSense (DANTEC)

Tabella 10_Tabella relativa ai dati registrati dalla Dantec

Dalla Tabella 10 sono riportati i dati dello strumento di misura dei dati microclimatici ovvero la Dantec e altre informazioni specifiche riguardanti la campagna di misurazioni effettuate nelle due aule di Falconara e Recanati. Per ognuno dei punti di acquisizione, infatti, le misurazioni sono durate più di 10 minuti per dare tempo all'operatore addetto allo spostamento dello strumento di entrare ed

uscire dall'aula senza variare le condizioni di temperatura e velocità dell'aria in quanto veniva aperta la porta, in oltre il range di acquisizione dei dati settato dallo strumento era di 5 secondi, dunque, il numero di dati per ogni posizione erano estremamente elevati. Essendo quindi i dati registrati di una durata maggiore di dieci minuti, i valori che eccedevano tale range temporale sono stati scartati e per ogni posizione è stata calcolata la media dei valori, in questo modo per ogni dato acquisito in ogni posizione e per ogni altezza sono stati ricavati valori di dati singoli.

Per modellare i dati ottenuti nelle misurazioni effettuate sulle aule è stato utilizzato il software Tecplot 360 che è uno strumento capace di effettuare visualizzazioni e analisi CFD ed è in grado di gestire set di dati di grandi dimensioni, automatizzare i flussi di lavoro e di visualizzare risultati parametrici. Questo strumento consente di comunicare i risultati con grafici XY, 2D e 3D integrati [62].

Nel caso oggetto di studio dopo aver sistemato i dati in fogli di calcolo excel (per ogni punto sono stati presi dieci minuti di tempo di acquisizione e per ogni intervallo è stata calcolata la media), suddivisi per tipologia di dati (es. velocità dell'aria, temperatura dell'aria ecc.), sono stati salvati come file con estensione .csv ed importati su Tecplot. Il programma ha permesso di interpolare i dati su un volume individuato delle posizioni planimetriche dei 13 punti di acquisizione dello strumento e avendo per ogni postazione 3 valori di dati ad altezze diverse si è potuto creare un volume. Dunque, il programma restituisce un 3D dei dati ed è stato possibile effettuare delle sezioni parallele agli assi x, y e z.

Di seguito verrà illustrato il procedimento operativo riguardante l'analisi dati e il loro inserimento nel programma Tecplot 360.

- Estrapolazione dei risultati dal software del ComfortSense Dantec;
- Organizzazione dei risultati in fogli di lavoro nel programma Excel: suddividendo ogni punto di presa del monitoraggio in un foglio di lavoro differente;
- Calcolo dei valori medi di velocità dell'aria, temperatura dell'aria, temperatura operativa, PMV e PPD: per ogni punto di presa della Dantec e per ogni altezza di presa (10 cm, 60 cm e 110 cm) sono stati calcolati i valori medi dei tre parametri registrati nell'arco dei 10 minuti in cui lo strumento ha registrato dati. Nel calcolo del valore medio sono stati eliminati i primi due minuti iniziali e finali, in quanto lo strumento potrebbe aver risentito della presenza dell'operatore che usciva o entrava nella stanza per azionare o spegnere lo stesso.

Il passo successivo per la realizzazione delle Mappe del Comfort ha richiesto l'elaborazione e il trattamento dei dati attraverso l'implementazione di essi all'interno del software Tecplot 360. Nella finestra *File*, attraverso la voce "*Load Data File*" è possibile caricare le tabelle di Excel selezionando la modalità di inserimento "*text spreadsheet loader*" (Figura 35).

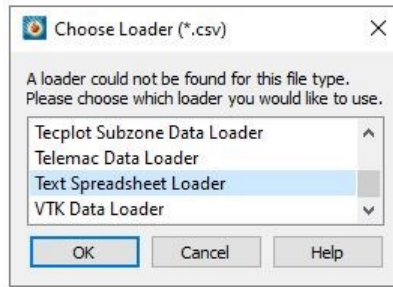


Figura 35_Caricamento risultati di monitoraggio nel software Tecplot

Nella sezione *Data*, alla voce “*Data set Info*” si va a controllare che l’inserimento dei dati sia andato a buon fine e che il parametro sul quale si sta lavorando compaia come variabile libera. Successivamente si procede andando a creare la zona di lavoro in cui verrà realizzata la mappa termica che viene generata in automatico dal programma in funzione delle coordinate assegnate ai punti di presa, attraverso la funzione “*Create Zone*”, “*Rectangular zone*” nella finestra “*Data*” (Figura 36).

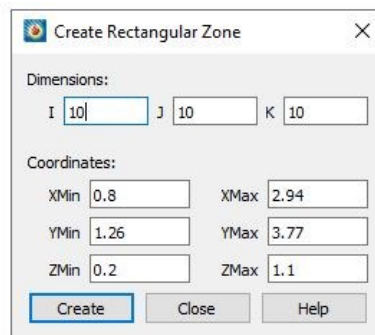


Figura 36_Creazione della zona di lavoro

Una volta creata la zona rettangolare, si procede con l’interpolazione dei dati, passo chiave per la realizzazione della mappa richiesta. Sempre nella finestra *Data*, alla voce “*Interpolation*”, selezionando “*inverse distance*” si va a scegliere la “*source zone*” ovvero la Zona 1, la “*Destination Zone*” cioè la zona rettangolare appena creata e la variabile d’interesse: la velocità dell’aria, la temperatura dell’aria o la temperatura operativa o PMV o PPD in base al dato che si sta analizzando (Figura 37).

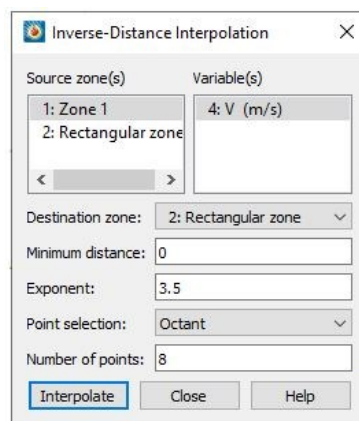


Figura 37_Interpolazione dei dati

In questo modo i valori medi di ogni variabile registrati in quel determinato punto di coordinate note vengono interpolati tra di loro per creare un volume o una superficie dove è leggibile la variazione di essi nello spazio assegnato. In seguito tramite la funzionalità “*zone style*” (Figura 38) si va a escludere la visione della zona 1 accendendo la visibilità alla zona rettangolare e successivamente attivando la voce “*contour*” si otterrà il risultato desiderato (Figura 39).

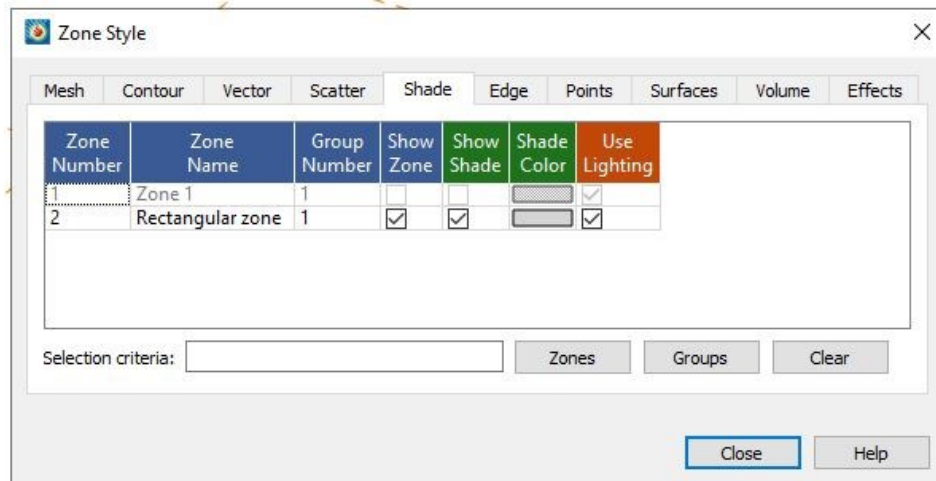


Figura 38_Zone style

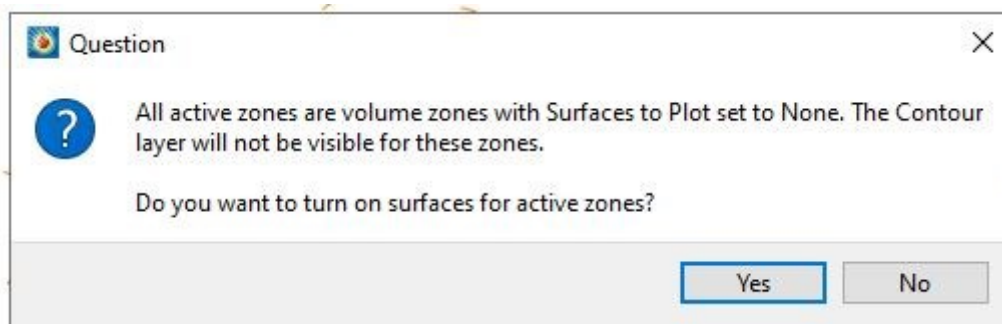


Figura 39_Contour

A questo punto il risultato può corrispondere ad una superficie o ad un volume in base ai valori assegnati alla coordinata Z (m), ad esempio nel caso della mappa termica relativa alla temperatura operativa, essendo il globo posizionato ad un'altezza costante di 60 cm da terra, il programma ci restituisce una superficie, piuttosto che un volume come nel caso della mappa della velocità dell'aria in cui i sensori sono posizionati a 3 altezze differenti (10 cm, 60 cm e 110 cm). Inoltre, il software consente di estrapolare sezioni a diverse altezze e per diversi assi in base alle necessità di studio. Per le mappe termiche si rimanda al capitolo 4.3.3 Analisi microclimatica.

3.3.5 Analisi del comfort

Attraverso l'uso di un manichino termico è stato possibile effettuare un'analisi molto accurata e approfondita del comfort di un utente. Infatti, il manichino rappresenta un uomo adulto alto 175 cm (per questo rappresenta un insegnante e non un alunno), avente un peso di 22 kg. È costituito da una calotta leggera in fibra di vetro e le articolazioni di collo, spalle, gomiti, fianchi e ginocchia sono in poliossimetilene.

Il suo corpo è suddiviso in 27 zone, Figura 40, sulle quali viene acquisita la temperatura cutanea e il flusso di calore. Vengono inoltre misurati i valori di Teq, PMV, PPD, SET* e Clo. Il manichino può essere utilizzato in tutti gli ambienti con temperature comprese tra -20 e +50 gradi e può essere posizionato in piedi, seduto o sdraiato a seconda dell'applicazione, in questo caso è stato utilizzato seduto.

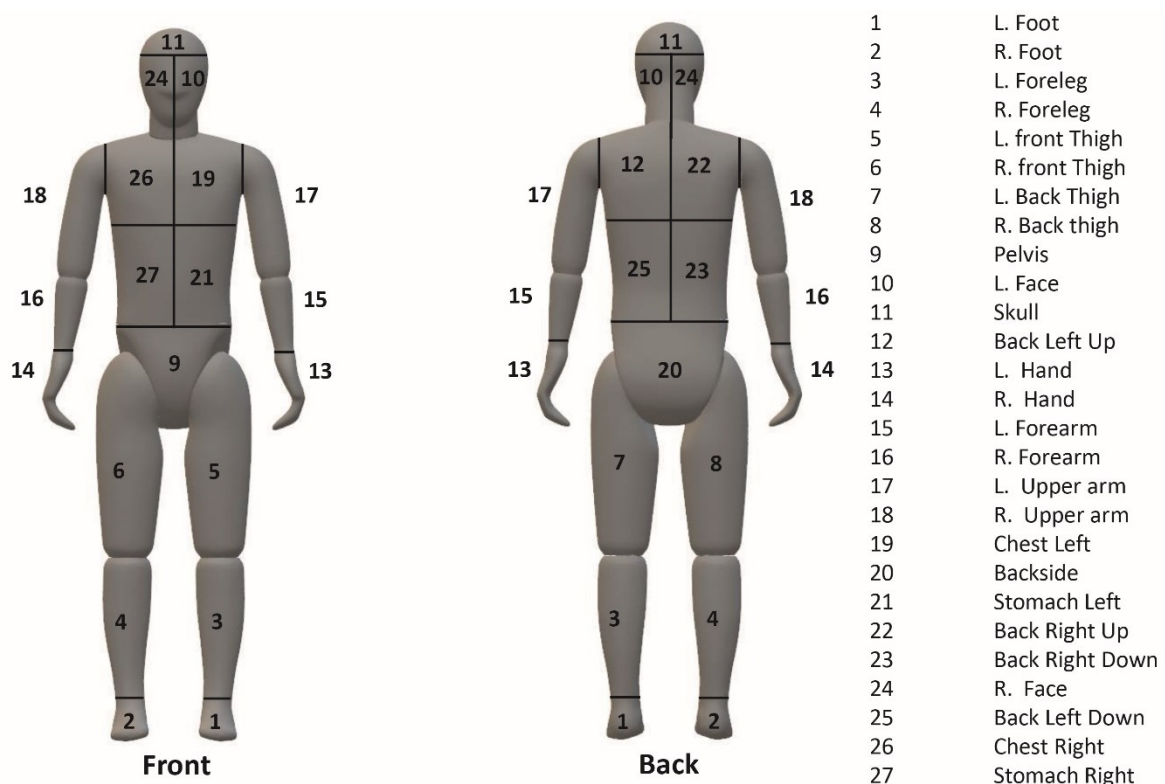


Figura 40_Schematizzazione del manichino fronte e retro con individuazione delle 27 parti del corpo

L'analisi del comfort attraverso il manichino termico è molto accurata e permette di valutare la temperatura superficiale, e il PMV e PPD non inserendo manualmente il clo ma calcolandolo con una procedura di settaggio effettuando prima una misura senza vestiti (nude clo) poi con i vestiti (clothing) ed impostando la temperatura dell'ambiente, precedentemente misurata con la Dantec vengono calcolati i clo. Questa procedura automatizzata del settaggio del manichino permette di ottenere misurazioni molto più precise rispetto a quelle ottenute con la Dantec.

Al momento delle prove nelle due scuole ovvero a giugno e luglio 2023 il manichino è stato vestito con indumenti tipici di quella stagione quindi con scarpe leggere, pantalone in cotone e t-shirt a manica corta in cotone come è possibile vedere dalla Figura 44.

Come illustrato nel capitolo precedente 3.3.4 Analisi microclimatica le misure effettuate con la Dantec sono state effettuate su 13 postazioni a simulare sia la presenza degli studenti in

corrispondenza dei banchi che la presenza dell'insegnante dietro la cattedra. Con il manichino invece le misurazioni sono state prese solo dietro la cattedra (posizione 13 corrispondente della Dantec) per simulare la presenza dell'insegnante in quanto il manichino rappresenta una persona adulta e dunque non compatibile con alunni di età scolare, quindi per questo motivo il manichino non è stato posizionato dietro ai banchi dove normalmente siedono gli studenti. Il manichino, per la posizione 13, ha rilevato dati per circa 10 minuti in contemporanea con la Dntec in modo da ottenere dati nello stesso orario di acquisizione ed effettuare dei confronti (4.3.4 Analisi del comfort). Per quanto riguarda l'elaborazione e l'analisi della temperatura equivalente è stata calcolata la media dei dati acquisiti nell'arco dei 10 minuti per ogni parte del corpo.

Il Manichino è diviso in 27 zone e per ognuna di esse ogni 30 secondi viene rilevata la temperatura equivalente superficiale. Questo dato dipende dai met e clo che il manichino calcola autonomamente con un processo di settaggio preliminare a differenza della Dantec in cui vanno impostati manualmente. I clo dipendono dal vestiario del manichino quindi in funzione di esso il manichino calcola la resistenza offerta dagli indumenti a contatto con la superficie della pelle.

Per spiegare cosa è la temperatura equivalente, immaginiamo di avere un utente e spostarlo da una stanza reale, in cui ci sono finestre e il calore viene trasmesso attraverso i meccanismi di conduzione, convezione ed irraggiamento ed in cui l'ambiente non è uniforme, cioè, ogni superficie ha una temperatura, ad una stanza immaginaria dove la velocità dell'aria è nulla, l'umidità è la stessa della stanza reale e la temperatura dell'aria è uguale alla temperatura media radiante. Affinché l'utente subisca la stessa perdita di calore devo variare la temperatura. Va sottolineato che la temperatura equivalente dipende dal livello di attività dell'utente (met) e dal vestiario (clo). (Figura 41)

Secondo la ISO 14505.2, la temperatura equivalente t_{eq} è calcolata per ogni parte del corpo del manichino con la formula seguente:

$$t_{eq_i} = t_{s_i} - RT_{cal_i} * q_{i} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

dove t_{s_i} è la temperatura superficiale della zona del corpo considerata ($^{\circ}\text{C}$), RT_{cal_i} è un coefficiente di calibrazione del vestiario ($\text{m}^2\text{K/W}$) e q_{i} è la densità del flusso di calore del manichino (W/m^2).

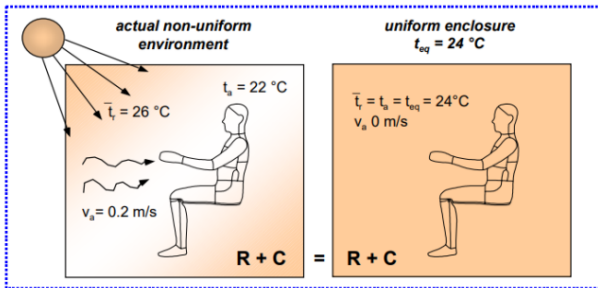
MTV (mean thermal vote) è un parametro calcolato per ogni zona del corpo del manichino e ha una scala che va da -3 a +3.

$$MTV_i = ((t_{s_i} - t_{eq_i} / RT_{cal_i} - a_i) / b_i)$$

$$t_{eq_i} = t_{s_i} - RT_{cal_i} * (a_i + b_i * MTV_i)$$

a_i e b_i sono due coefficienti che dipendono dalla zona del corpo del manichino.

Illustration of the definition of equivalent temperature



ISO 14 505 – LOCAL COMFORT (MTV)

Local MTV index combining sensation and comfort

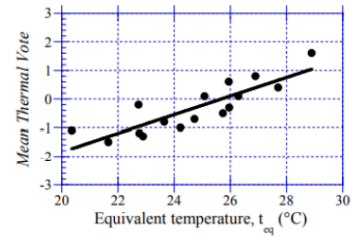


Figura 41_Calcolo della temperatura equivalente t_{eq} e dipendenza con Mean Thermal Vote MTV.

In base alla T_{eq} calcolata per ogni parte del corpo del manichino e considerando che le prove sono state effettuate nella stagione estiva (il manichino indossa un vestiario leggero), si può definire il comfort facendo riferimento alla figura sottostante Figura 42.

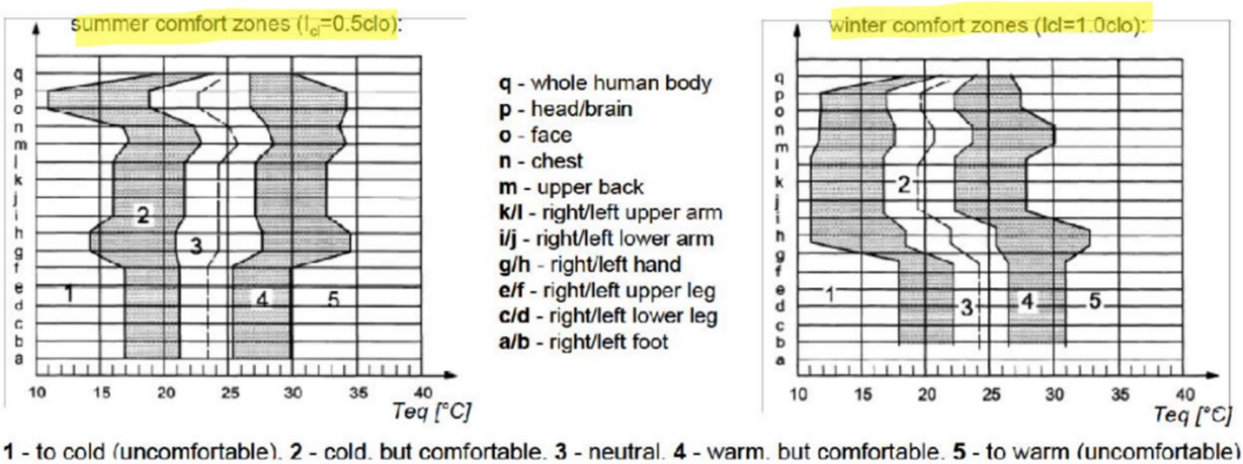


Figura 42_Tabelle da ISO 14505 in condizioni di vestiario estivo a sinistra ed invernale a destra

Come detto, nelle righe sopra, la temperatura equivalente è acquisita dal manichino in 27 zone numerate ed ognuna di esse, considerando che il manichino è seduto, ricadrà in un'area in corrispondenza della zona a 10 cm da terra, a 60 cm da terra e 110 cm da terra come viene illustrato nella Figura 43. Questo procedimento di suddivisione delle varie zone è servito per associare la temperatura dell'aria e la velocità dell'aria registrate con la Dantec alla temperatura equivalente delle varie zone del manichino.

Le zone del corpo che ricadono nell'area a 10 cm sono: piede destro e sinistro e gamba destra e sinistra.

Le zone del corpo che ricadono nell'area a 60 cm sono: coscia anteriore destra e sinistra, coscia posteriore destra e sinistra, bacino anteriore e posteriore, stomaco destro e sinistro, schiena bassa destra e sinistra, mano destra e sinistra, avambraccio destro e sinistro.

Le zone del corpo che ricadono nell'area a 110 cm sono: braccio destro e sinistro, petto destro e sinistro, schiena alta destra e sinistra, faccia destra e sinistra e cranio.

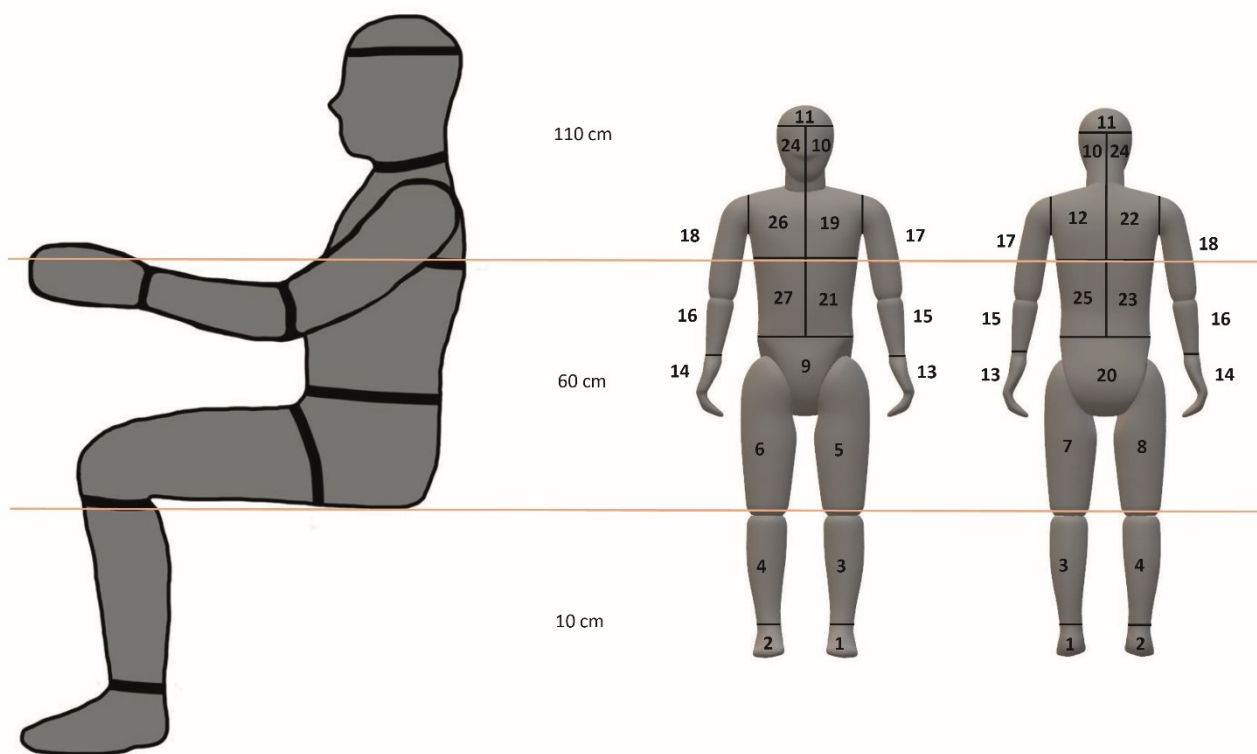


Figura 43_Schematizzazione del manichino seduto con suddivisione delle 27 parti del corpo nelle 3 zone a 10 cm, 60 cm e 110 cm



Figura 44_Manichino nella scuola di Falconara a sinistra e Recanati a destra

4 Risultati

4.1 Analisi tipologica

Definizione delle condizioni limite tipiche

Esposizione climatica tipica

Le 102 scuole identificate con ventilazione meccanica controllata rappresentano il 5% dell'intero patrimonio scolastico regionale. La loro distribuzione sul territorio marchigiano garantisce una variabilità di gradi giorno (HDD) che va da 1495 a 2993. Ai sensi del DPR 412/93[63], le zone climatiche del territorio sono D ed E e definiscono il periodo dell'anno e il numero massimo di ore giornaliere in cui è possibile accendere gli impianti di riscaldamento (Tabella 11).

Zona climatica	HDD	Periodo in vigore	Ore concesse
D	1402 - 2100	1 st Nov – 15 th Apr	12 ore al giorno
E	2101 - 3000	15 th Oct – 15 th Apr	14 ore al giorno

Tabella 11 _Indicazioni del Decreto Presidenziale 412/93 su HDD

Esposizione dell'ambiente tipica

In termini di inquinamento Figura 45, quasi tutti gli edifici scolastici della regione Marche e dotati di VMC (177), sono situati in aree distanti dalle principali fonti di rumore, dalle fonti di radiazioni elettromagnetiche e in generale da tutte le fonti che possono contribuire all'inquinamento atmosferico esterno; quindi, il 93% delle scuole si trova in un contesto senza disturbi.

Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, si può dire che la distanza delle scuole dal traffico ferroviario e veicolare o dall'industria permette di limitare gli inquinanti dell'aria interna come CO, nerofumo (BC), NO_x, SO₂, PM, ozono (O₃) e composti organici volatili (VOC) [33][64]. Nonostante quest'ultimo aspetto, i sistemi di ventilazione meccanica installati nelle scuole sono dotati di filtri sulle griglie di mandata e di ritorno che consentono di catturare diversi tipi di particelle con diversi gradi di efficienza.

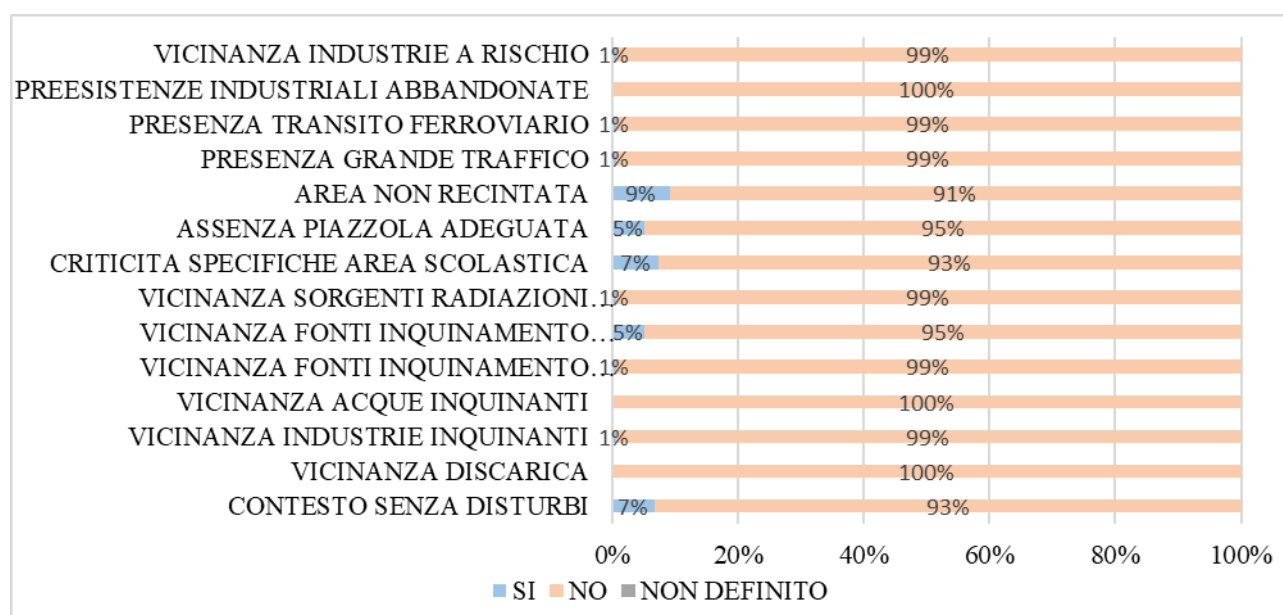


Figura 45 _Presenza di possibili fonti di inquinamento nelle immediate vicinanze delle scuole

Interventi energetici esistenti

In termini di energia ed efficientamento energetico (impianto e involucro), il 95% delle scuole intervistate dispone di un sistema di riscaldamento centralizzato a metano con radiatori (Figura 46) e solo il 7%, il 2% e il 2% rispettivamente di teleriscaldamento, riscaldamento centralizzato a gasolio e riscaldamento centralizzato a gas propano liquido. Inoltre, nelle scuole sono state adottate diverse soluzioni di miglioramento (Figura 47), come l'introduzione di finestre con doppi vetri nel 68% dei casi, valvole termostatiche di zona per l'impianto di riscaldamento (58%) o l'isolamento termico della soletta del tetto (42%). In percentuali inferiori al 35%, gli interventi hanno riguardato l'isolamento delle pareti esterne, l'adozione di impianti fotovoltaici e, infine, l'installazione di pannelli solari termici. Molto più rare sono invece le misure adottate per migliorare il comfort acustico degli edifici scolastici oggetto di studio che risultano infatti essere sotto al 22% (Figura 48).

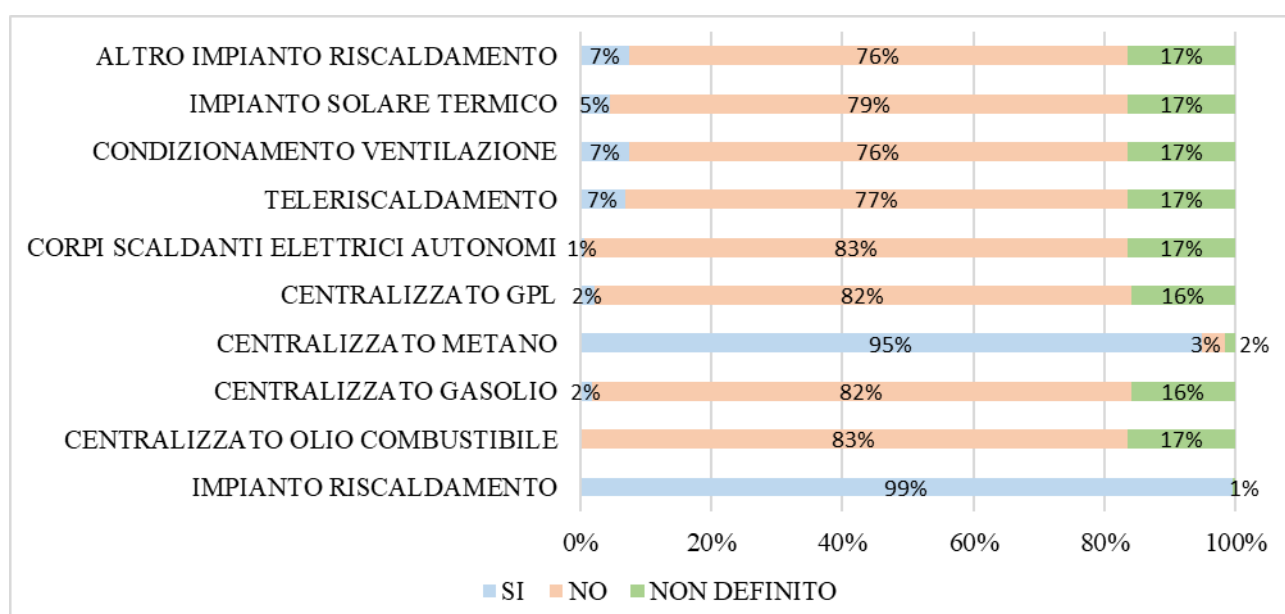


Figura 46_Tipo di riscaldamento presente nelle scuole

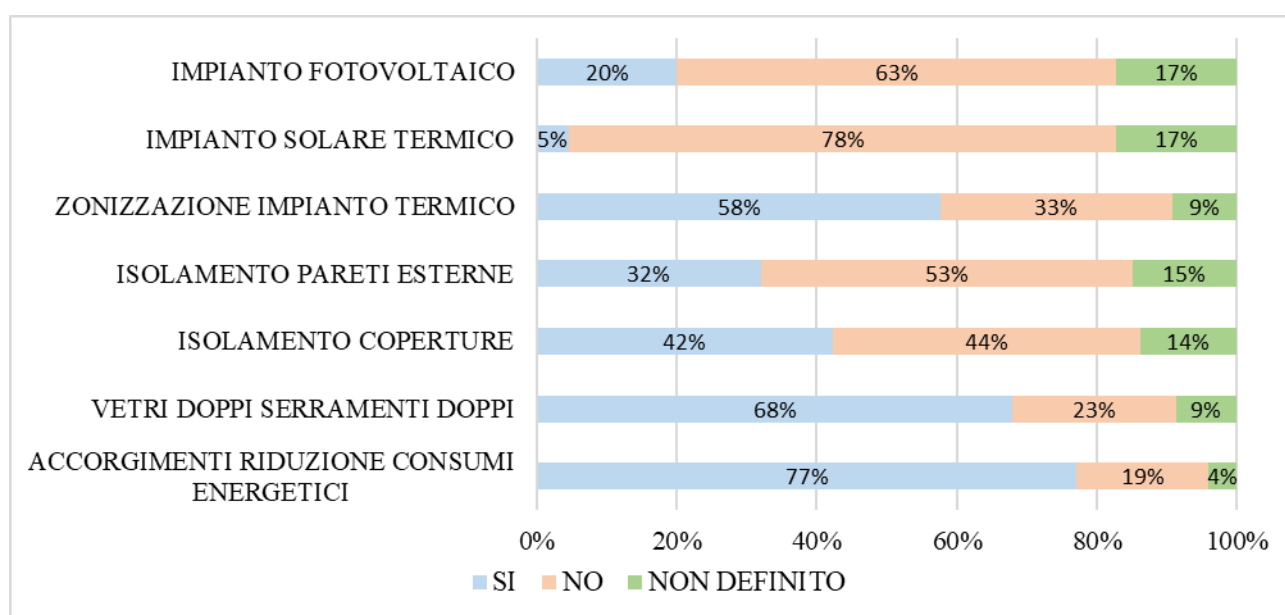


Figura 47_Presenza di sistemi per aumentare l'efficienza energetica

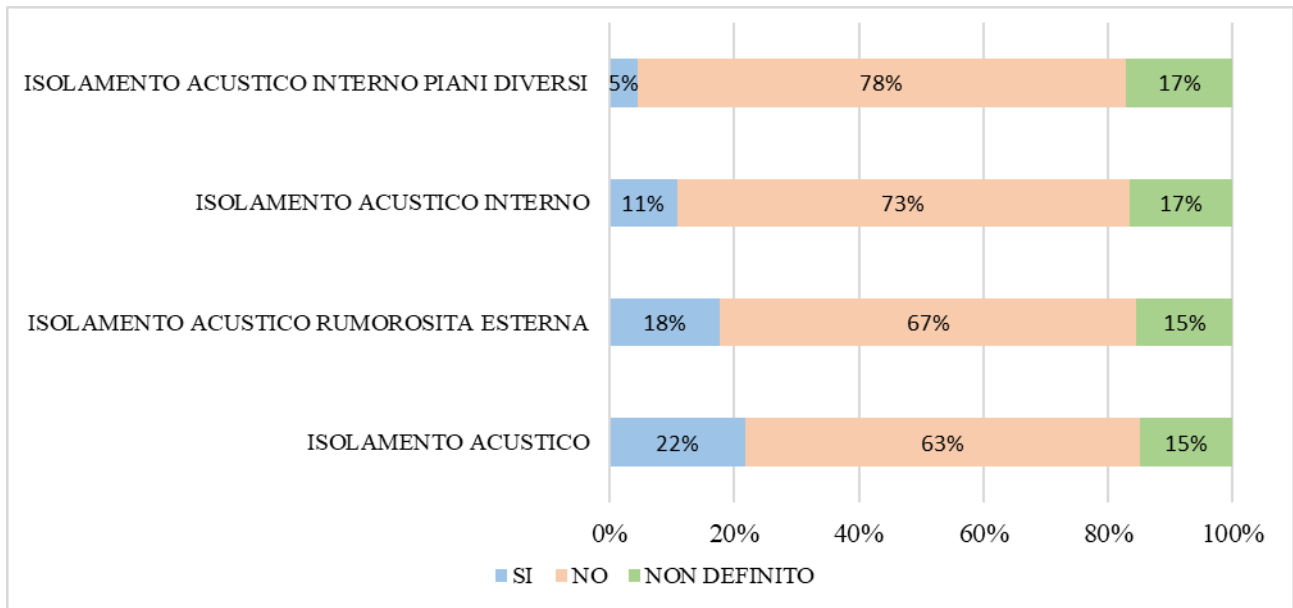


Figura 48_Presenza di sistemi che aumentano l'insonorizzazione

Definizione dell'anno di costruzione più ricorrente e del tipo di VMC

Per quanto riguarda i tipi di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC), sono stati identificati quattro diversi sistemi (Figura 49):

- Delocalizzato (D), in cui le macchine sono situate all'interno dell'aula. Le griglie di mandata e di estrazione sono posizionate sulla macchina.
- Delocalizzato con unità e condotti interni (DI), in cui la macchina si trova nel controsoffitto e serve una singola aula. La distribuzione dell'aria avviene tramite canalizzazioni posizionate nel controsoffitto.
- Delocalizzato con unità esterne all'aula (DE) in cui le macchine sono situate all'esterno dell'aula. Le griglie di mandata e di ripresa sono posizionate sulla parete adiacente alla macchina.
- Centralizzato (C) in cui un'unica macchina esterna serve l'intero edificio o porzioni di esso attraverso canalizzazioni.

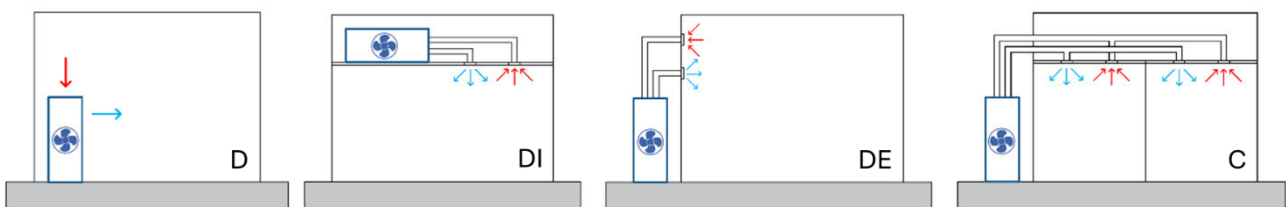


Figura 49_Tipologie di impianti di Ventilazione Meccanica Controllata installati nelle Scuole

Il campione di 177 scuole della regione Marche dotate di VMC (Figura 50) comprende: (i) 2 edifici con sistema C centralizzato, (ii) 166 edifici con sistema D delocalizzato, (iii) 5 edifici con sistema DE delocalizzato e (iv) 4 edifici con sistema DI delocalizzato.

Dal grafico in Figura 50 si può notare la suddivisione delle scuole a seconda della tipologia di impianto VMC installato e dell'anno di costruzione.

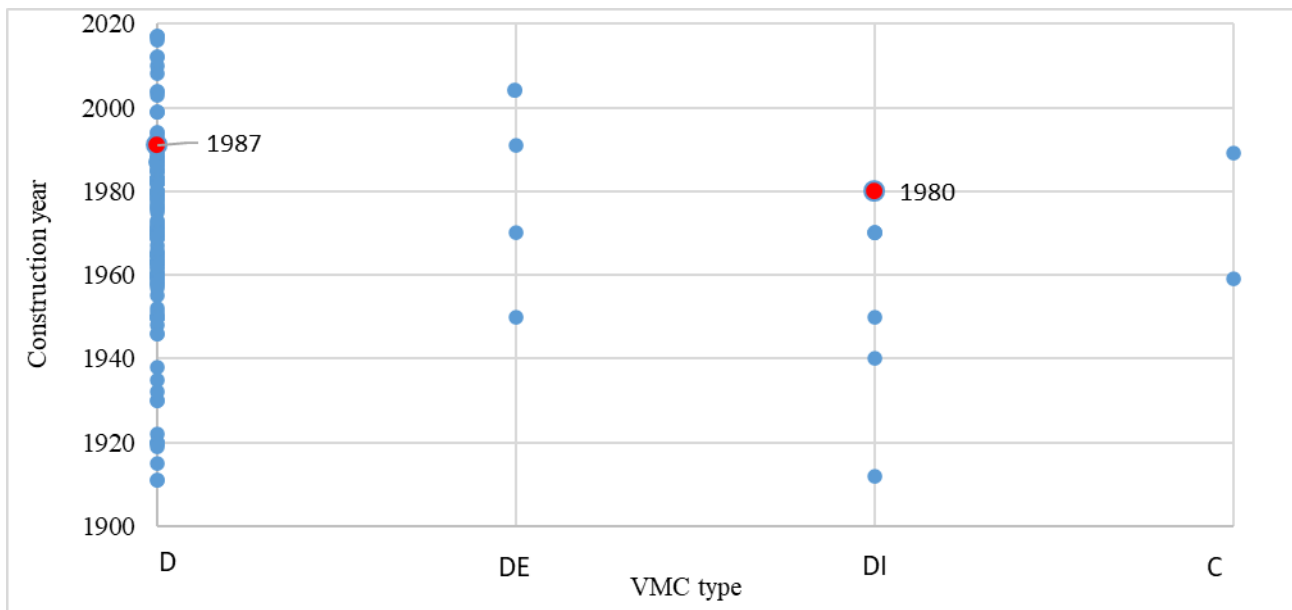


Figura 50_Grafico che individua le 177 Scuole dotate di VMC della Regione Marche. i due pallini rossi individuano le 2 scuole sulle quali sono state effettuate analisi approfondite.

Definizione di archetipi di aule e della percentuale finestrata

Per le 102 scuole, è stata selezionata un'aula tipo (una per ogni scuola secondo un criterio di maggior ricorrenza tra le aule didattiche presenti nella scuola cioè dato che per ogni scuola più aule sono state oggetto di intervento di ripristino degli impianti, le “aule tipo” erano quelle aule aventi forma ricorrente per almeno metà delle aule sulle quali sono stati effettuati interventi di installazione VMC) sono state individuate tre forme tipiche (Figura 52): (i) quella ampia, cioè quella con la finestra sul lato lungo, (ii) quella quadrata e (iii) quella profonda, cioè quella con la finestra sul lato corto. Confrontando le dimensioni dei due lati della stanza (Yside e Xside dove Yside è il lato su cui insiste la finestra), dedotte dalle planimetrie delle scuole, è stato possibile identificare indici rappresentativi per le tre forme:

- $(Y_{side} / X_{side}) > 1,22$: aula ampia; ricadono in questo archetipo 38 aule (w)
- $0,82 \leq (Y_{side} / X_{side}) \leq 1,22$: aula quadrata; ricadono in questo archetipo 52 aule (s)
- $(Y_{side} / X_{side}) < 0,82$: Aula profonda; ricadono in questo archetipo 12 aule (d)

L'aula quadrata sembra essere la più popolare, seguita da quella ampia e da quella profonda rispettivamente per il 51%, il 37% e l'12% sul totale delle scuole analizzate (102).

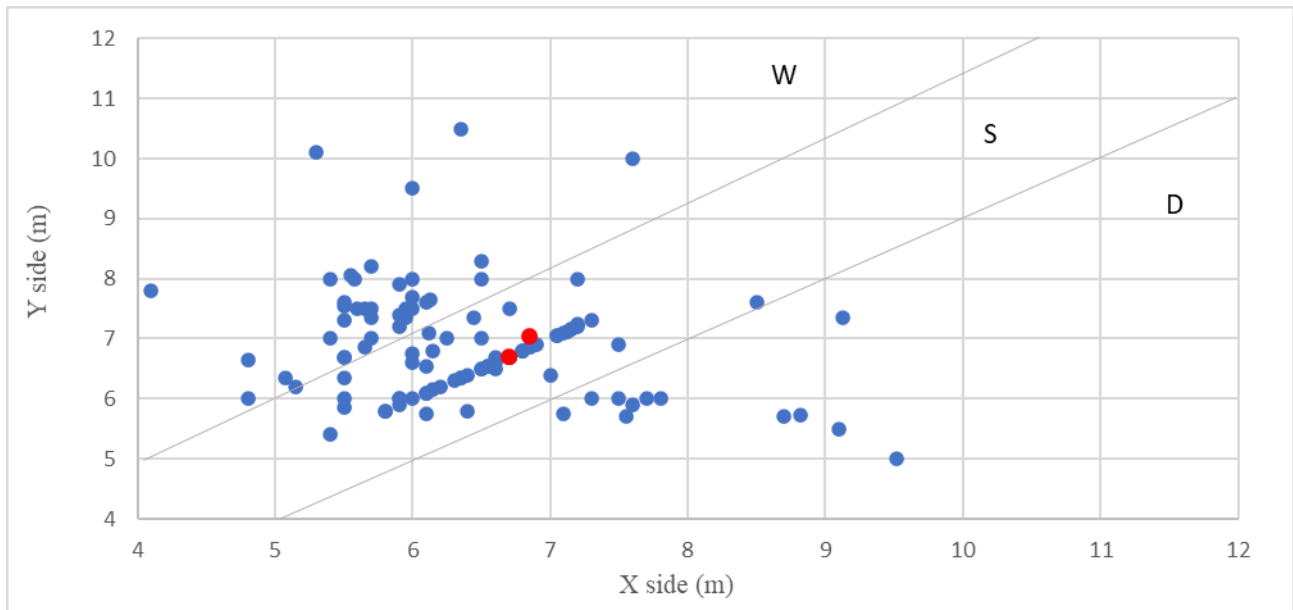


Figura 51_Grafico che illustra le scuole dotate di VMC della regione Marche delle quali si sono ricavate informazioni geometriche sulle aule. Il lato Y è quello dove ci sono le finestre. I due punti rossi sono le due aule oggetto di analisi più approfondite

Inoltre, le percentuali finestrate di tutte le aule sono state calcolate come rapporto tra l'area della finestra e l'area della parete su cui è posizionata. Le percentuali delle aree finestrate, a seconda della geometria dell'aula, sono descritte nella Tabella 12. In questa tabella sono riportati i range di percentuale finestrata (sono stati scelti ogni 10%) a partire dal 16% fino al 75% in quanto nessuna scuola risulta avere aule ricadenti oltre tali limiti. Ad ogni range corrisponde una categoria di percentuale finestrata in cui ogni archetipo di aula ricade.

Per quanto riguarda le aule quadrate, la maggior parte di esse ricade nella categoria del 30% finestrato, le aule profonde ricadono per la maggioranza nella categoria del 40%, così come le aule ampie anche se per queste si registra un'ampia presenza di aule con finestre di dimensioni minori che ricadono in una percentuale finestrata compresa tra il 20% e il 30%.

RANGE % FINESTRATA		CATEGORIA %FINESTRATA	ARCHETIPO AULA		
da	a		Quadrata	Profonda	Ampia
16%	25%	20%	23%	25%	29%
26%	35%	30%	50%	17%	29%
36%	45%	40%	17%	33%	34%
46%	55%	50%	10%	8%	5%
56%	65%	60%	0%	8%	3%
66%	75%	70%	0%	0%	0%

Tabella 12_Percentuale finestrata in funzione della geometria delle aule

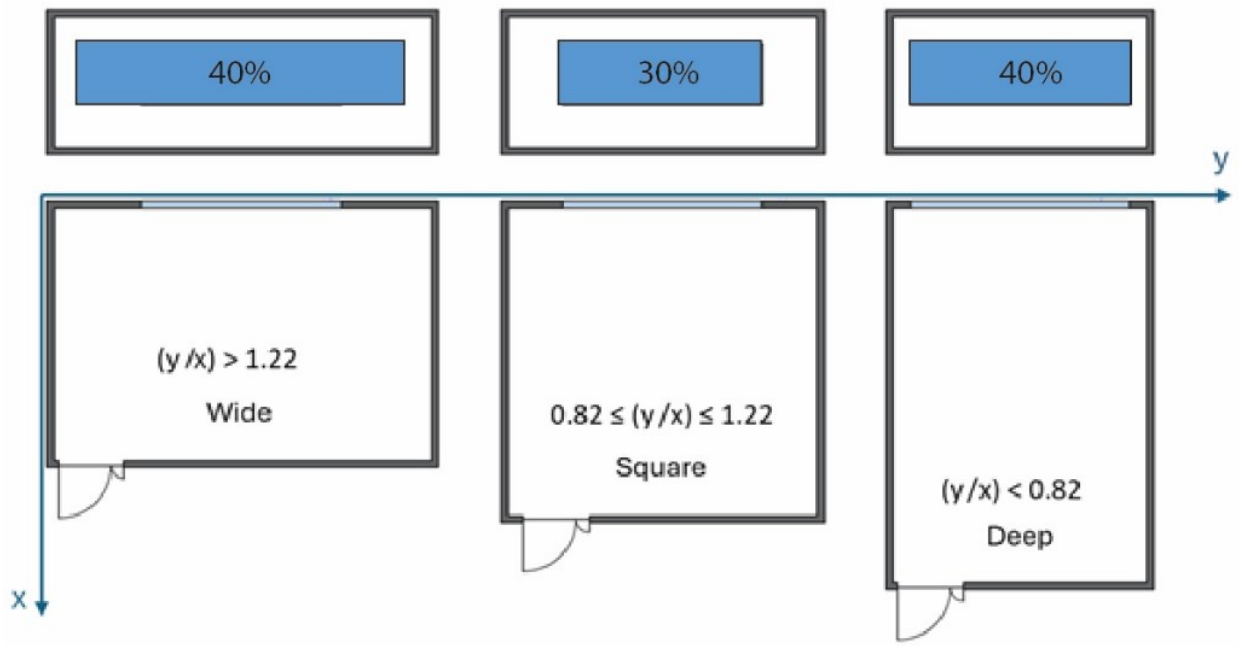


Figura 52_Geometrie tipiche di aule ampie, quadrate e profonde e relative percentuali finestrate

4.2 Analisi fattore medio di luce diurna

Le classi scolastiche, ai fini della sicurezza, devono rispettare dei parametri previsti da varie norme che impongono limiti all'affollamento delle stesse.

In primo luogo, secondo il DM 18 dicembre 1975 “Norme tecniche aggiornate relative all’edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica”, sono previsti i seguenti standard minimi di superficie per garantire condizioni igienico-sanitarie compatibili con l’attività didattica: per la scuola dell’infanzia, primaria e media mq/alunno 1,80, mentre per la scuola secondaria mq/alunno 1,96. Inoltre, l’altezza dei soffitti delle aule non può essere inferiore a 3 metri.

Stabilito ciò, considerando una superficie minima di 50 m², le alternative geometriche di forma delle aule dipendono dal rapporto dimensionale dei due lati dell’aula. Pertanto, si individuano aule quadrate, aule profonde e larghe come descritto al capitolo 4.1 Analisi tipologica. Ciò che distingue le aule profonde dalle larghe è che nella prima le finestre sono sul lato corto mentre nella seconda sono sul lato lungo. Recenti studi hanno individuato una dimensione tipo per l’aula quadrata di 7,20*7,20 e per le aule profonde e larghe di 5,80*8,60. (Figura 53)

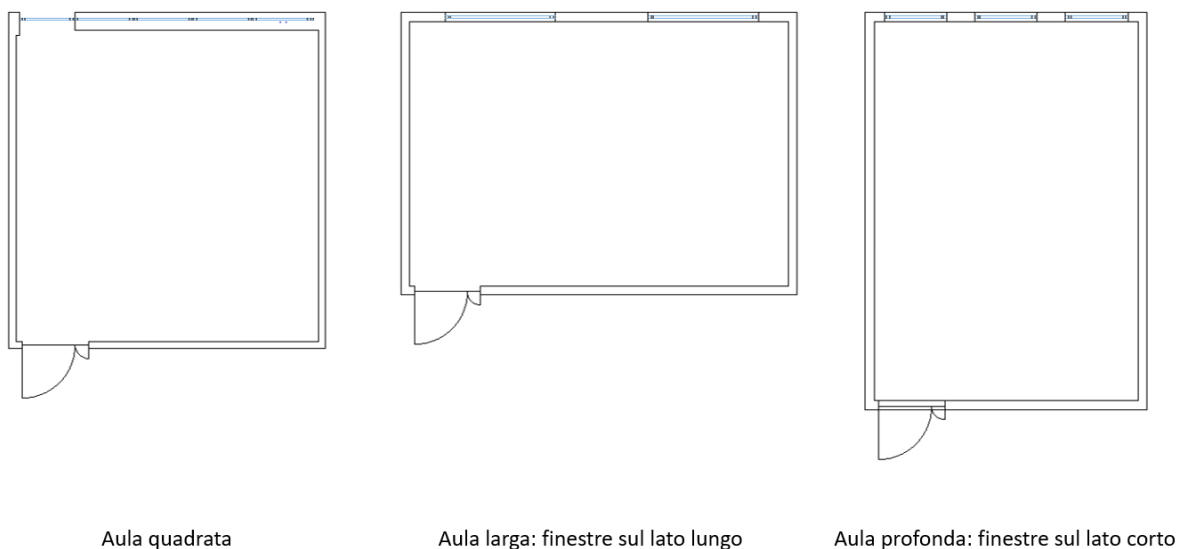


Figura 53_Rappresentazione delle 3 forme di aula considerate

Il fattore medio di luce diurna, valutato come rapporto tra la media dei valori di illuminamento relativi all'interno e la media dei valori di illuminamento relativi all'esterno ($ADF = E_m/E_{0M}$), deve essere maggiore o uguale a 3 per garantire un'illuminazione naturale adeguata e uniforme dello spazio didattico secondo la UNI EN 12464-1.

Per le 3 forme d’aula individuate, è stato utilizzato il programma Velux Daylight di cui si è discusso al capitolo 3.2 Analisi fattore medio di luce diurna per il calcolo del fattore medio di luce diurna considerando le dimensioni standard delle aule e le percentuali finestrate ricavate nel paragrafo precedente.

È stato ottenuto come risultato che l'aula ampia, con una superficie finestrata di 10,32 m² (equivalente al 40% della superficie della parete) garantisce un ADF del 5,3%, l'aula quadrata con una superficie finestrata di 6,5 m² (equivalente al 30% della superficie della parete) garantisce un ADF del 3,6% e

l'aula profonda con una superficie finestrata di 7,0 m² (equivalente al 40% della superficie della parete) garantisce un ADF del 4,2%. Il fattore medio di luce diurna è verificato in tutti e tre i casi (Figura 54).

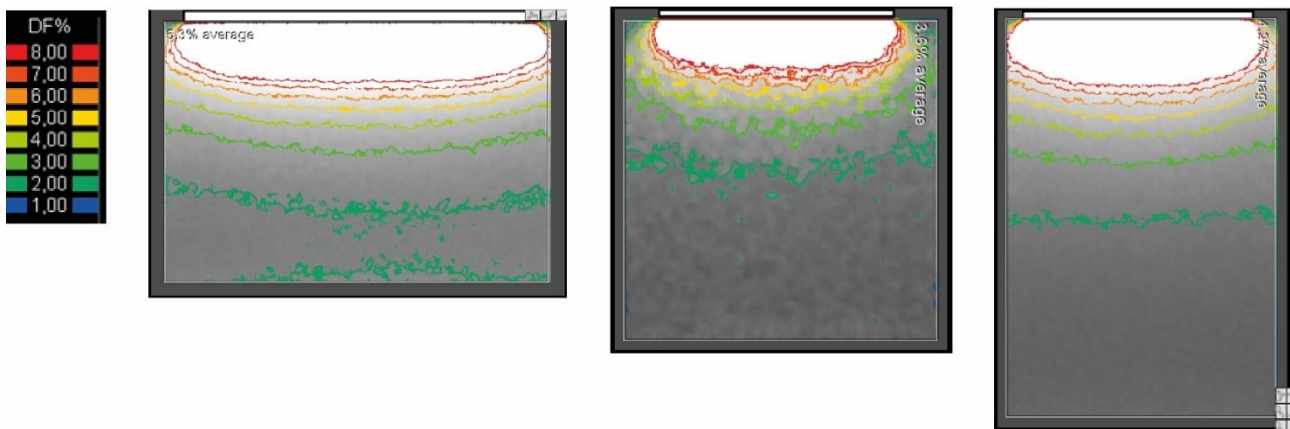


Figura 54 _Calcolo del fattore medio di luce diurna per le 3 tipologie di aule e rispettive percentuali finestate

Considerando che una maggiore superficie finestrata corrisponde a un maggiore fabbisogno energetico invernale e quindi a un consumo più elevato, il fattore medio di luce diurna viene ricalcolato e verificato riducendo al minimo la dimensione della finestra. In questo caso, l'ADF del 3% è verificato con una percentuale di finestre pari a: (i) 23% per la classe ampia, (ii) 28% per la classe quadrata e (iii) 33% per la classe profonda. Queste percentuali consentono di ridurre le aree delle finestre di 0,6 m², 0,5 m² e 1,3 m² per le classi ampie, quadrate e profonde rispettivamente.

Riassumendo le informazioni estrapolate dai dati analizzati e dalle simulazioni condotte per limitare i consumi, e considerando una superficie minima legale e un'altezza minima delle aule [55] rispettivamente di 50m² e 3m, si possono identificare 3 tipi di aule ottimizzate:

- Aule ampie, con dimensioni di 5,8 m x 8,6 m e superficie minima delle finestre sul lato lungo di 5,9 m²;
- Aule quadrate, dimensioni di 7,2 m x 7,2 m e superficie minima delle finestre di 6,0 m²;
- Aule profonde, con dimensioni di 8,6 m x 5,8 m e una superficie minima delle finestre sul lato corto di 5,7 m².

4.3 Analisi sperimentale su due casi studio a confronto

4.3.1 Analisi sul medio periodo

Analisi su due settimane

L'intervallo di tempo in cui sono stati acquisiti i dati nelle due scuole va dal 15 maggio 2023 al 26 maggio 2023 perché tale finestra temporale interessa due settimane scolastiche in cui gli studenti erano presenti in aula tutti i giorni dal lunedì al venerdì e svolgevano regolarmente lezione. Infatti, come già spiegato nel capitolo 3.3.2 Analisi sul medio periodo, il periodo di acquisizione era più ampio ma alcuni giorni sono stati scartati al fine di ottenere due settimane comuni ad entrambe le scuole.

Si è proceduto a graficizzare gli andamenti della temperatura interna alle aule e livelli di CO₂ per entrambe le settimane, mettendole in luce con colori diversi. Il colore rosso identifica la scuola di Falconara mentre il colore verde la scuola di Recanati (questi colori verranno mantenuti anche nei successivi grafici che riguardano il confronto tra le due scuole e nei successivi capitoli). Dal grafico si individuano sull'asse delle ascisse i giorni della settimana e per ogni giorno vengono riportati i dati delle 24 ore da mezzanotte del giorno x a mezzanotte del giorno x+1 tenendo presente che lo strumento ha un intervallo di acquisizione ogni minuto.

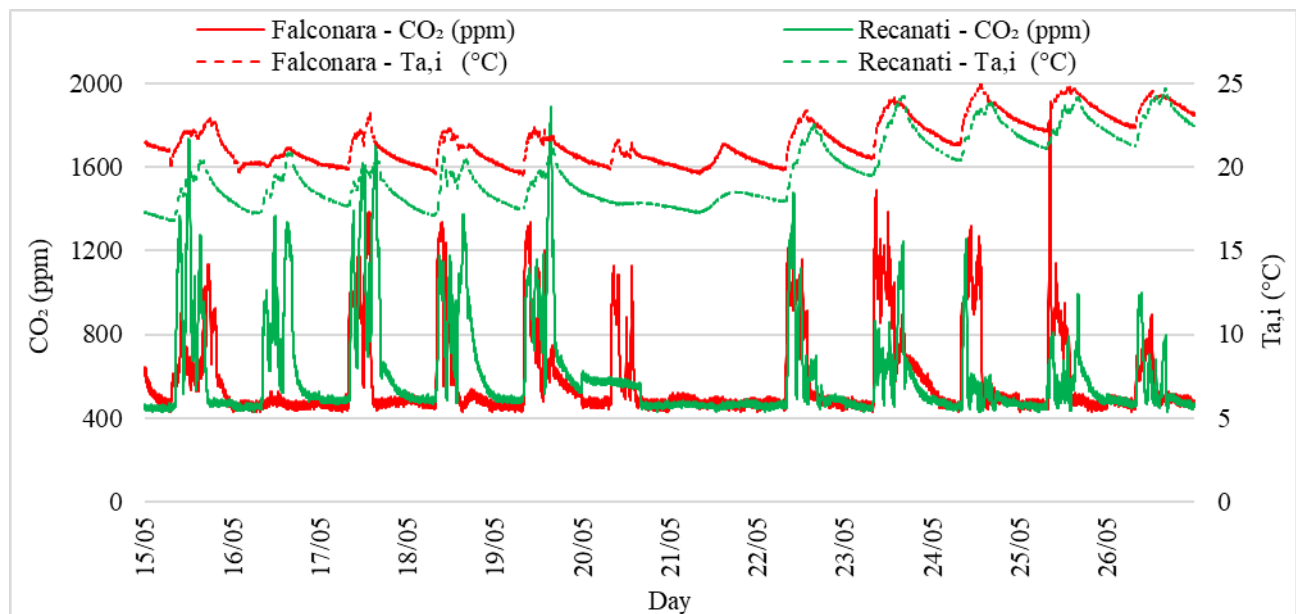


Figura 55_Grafico dell'andamento di temperatura e CO₂ delle due settimane oggetto di indagine

Ciò che emerge da questo primo grafico complessivo in Figura 55 in cui vengono illustrate le 2 settimane analizzate è che nella prima settimana che va dal 15 al 20 maggio, la CO₂ registrata nella scuola di Recanati sembra avere picchi anomali con valori molto elevati, sopra i 1600 ppm, anche quando da orario scolastico nessuno era presente nell'aula, perché gli studenti escono alle 16:20 mentre i picchi di CO₂ si hanno anche alle 19:00. Queste rilevazioni ci hanno indotto a pensare che c'è stato un malfunzionamento dello strumento o lo strumento doveva ancora essere settato.

A dimostrazione di quanto appena affermato entrambe le settimane scolastiche sono state studiate singolarmente e dunque seguiranno due grafici per ognuna di esse nei quali i dati riportati sono relativi

a temperatura dell'aria e CO₂ di tutto l'arco della giornata sia quando gli studenti sono in classe che, quando le lezioni sono terminate e anche in orario notturno.

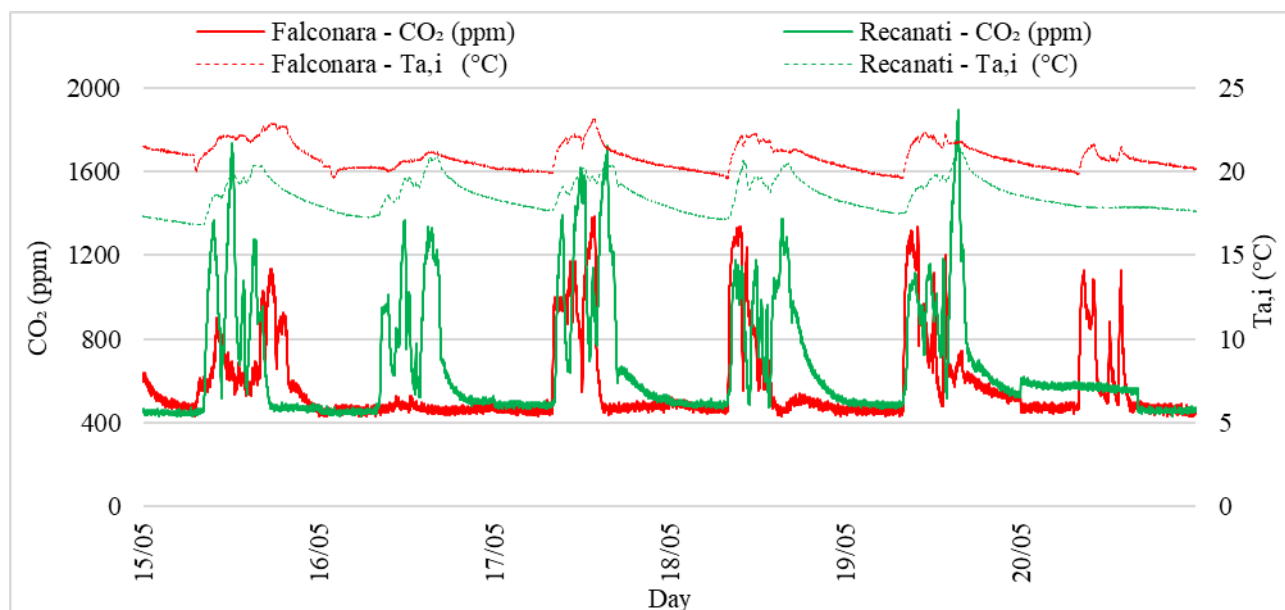


Figura 56_Grafico dell'andamento di temperatura e CO₂ dal 15 al 20 maggio, prima settimana

Come detto sopra, nella prima settimana illustrata nel grafico in Figura 56, si nota il secondo giorno (martedì 16 maggio) in cui risultano evidenti variazioni dei livelli di CO₂ solo per la scuola di Recanati mentre per quella di Falconara la CO₂ rimane stabile a circa 430 ppm sinonimo del fatto che nessuno studente è presente in aula. Sabato 20 maggio invece si osservano variazioni dei livelli di CO₂ per la scuola di Falconara, che ci inducono a pensare che erano presenti studenti in classe, infatti, dalle informazioni dedotte dalla scuola di cui si è parlato al capitolo 3.3.1 Generalità dei due casi studio, il sabato sono state recuperate le lezioni perse il martedì precedente, mentre la scuola di Recanati mantiene un valore costante di CO₂ a 430 ppm circa perché il sabato non sono state svolte le lezioni come da orario scolastico.

Oltre al discorso dell'incongruenza tra giorni scolastici, si può discutere dei livelli di CO₂ registrati dalle due scuole, infatti Recanati sembrerebbe avere livelli di anidride carbonica molto più elevati rispetto Falconara, a volte doppi come si nota per lunedì 15 maggio e venerdì 19 maggio, e quello che si evidenzia sono valori elevati anche dopo le 16.20 orario in cui le lezioni terminano nella scuola di Recanati. Probabilmente questi livelli così elevati sono dovuti a un malfunzionamento dell'acquisitore e dunque anche per questo motivo la prima settimana è stata scartata per i fini della valutazione dei dati relativi a temperatura dell'aria e CO₂.

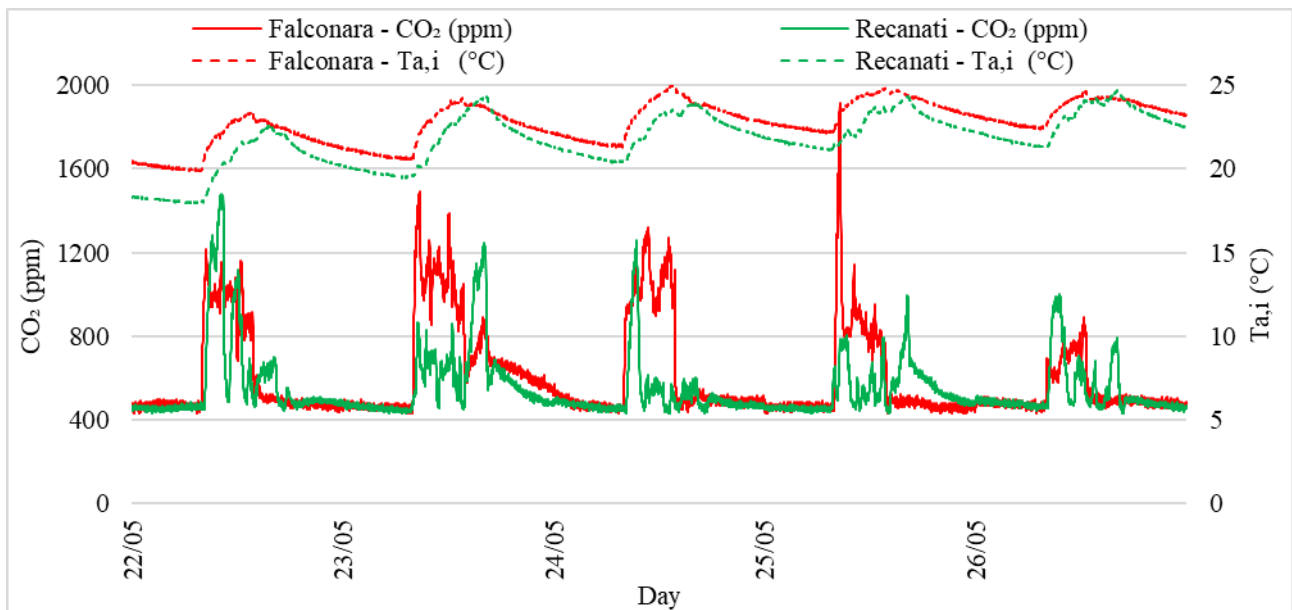


Figura 57_Grafico dell'andamento di temperatura e CO₂ dal 22 al 26 maggio, seconda settimana

Nella seconda settimana Figura 57, da lunedì 22 a venerdì 26 maggio, entrambe le scuole svolgono lezioni dal lunedì al venerdì in modo regolare, non si notano valori normali di CO₂ eccetto un piccolo giovedì 25 maggio per la scuola di Falconara. La settimana riporta i valori relativi a tutti i giorni per 24 ore, dunque, sono riportati i valori sia relativi ad orario scolastico che extrascolastico e notturno con acquisizioni fatte ogni minuto.

Dopo aver illustrato le due settimane e i dati relative ad esse in modo dettagliato, e per i motivi di cui si è discusso sopra è stata scelta la seconda settimana di acquisizione dati ovvero quella che va dal 22 maggio al 26 maggio per effettuare un confronto tra le due scuole; dunque, da ora in avanti si parlerà solo della seconda settimana.

Analisi su orario comune ad entrambe le scuole

Per avere una valutazione più accurata e precisa di come variano gli andamenti dei dati acquisiti, si è pensato in primo luogo di valutare la settimana in esame anziché sulle 24 ore della giornata, come è stato illustrato nei paragrafi precedenti, sui soli orari di lezioni comuni ad entrambe le scuole.

Considerando che la scuola di Falconara svolge lezioni solo la mattina (8.00-13.45) mentre quella di Recanati sia mattina che pomeriggio (8.20-12.20/14.00-16.20). L'orario scolastico in cui entrambe le scuole svolgevano le lezioni va dalle 8.20 alle 12.20.

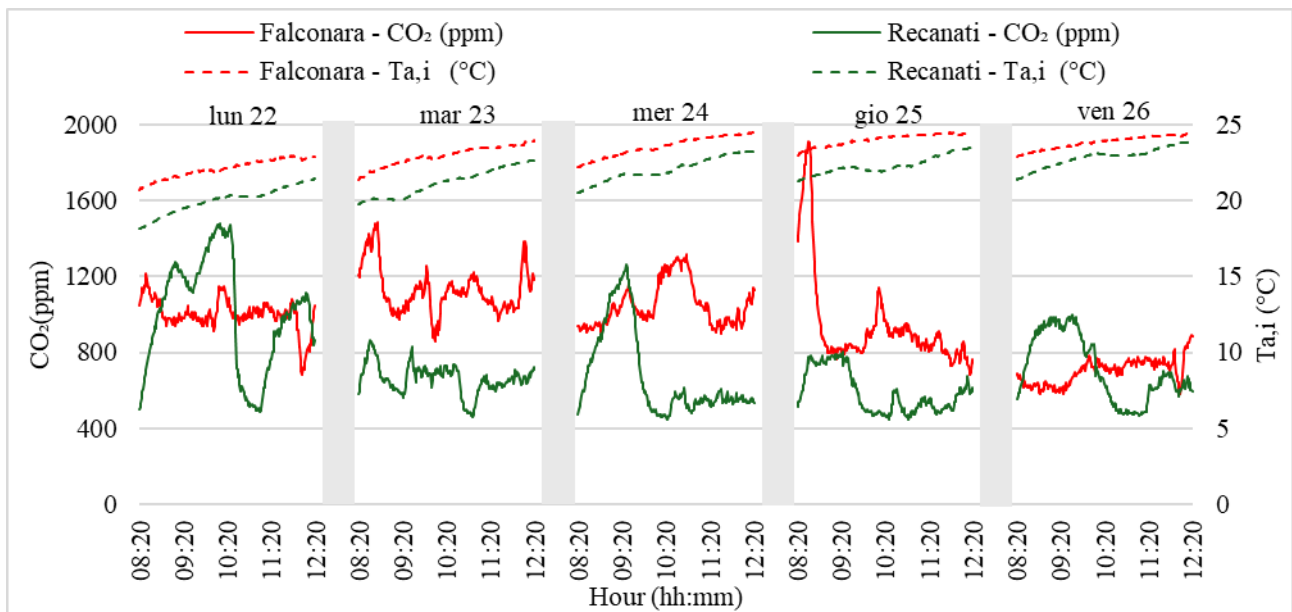


Figura 58_Grafico dell'andamento di temperatura e CO₂ dal 22 al 26 maggio considerando la fascia oraria dalle 8:20 alle 12:20

Dal grafico in Figura 58 per quanto riguarda la temperatura si nota un graduale innalzamento di circa 2 gradi per tutti i giorni della settimana tra le 8:20 in cui si registra la minima e le 12:20 in cui si registra il valore massimo. Inoltre, per tutti i giorni, la temperatura registrata a Falconara è maggiore di quella registrata a Recanati.

I livelli di CO₂ a Recanati oscillano molto tra i 430 ppm e i 1400 ppm, le variazioni sono consistenti per la maggior parte dei giorni della settimana segno del fatto che gli utenti nell'aula entrano ed escono e probabilmente vengono aperte le finestre, mentre a Falconara le registrazioni dei livelli di CO₂ presentano oscillazioni in valore ma il livello non scende mai a 430 ppm, segno del fatto che ad esempio gli studenti escono a ricreazione, ma si mantiene sempre sopra i 500 ppm e questo ci induce a pensare che probabilmente gli alunni restano in classe o non vengono aperte le finestre in modo sufficiente a garantire aerazione nell'aula.

Al fine di avere un quadro complessivo degli andamenti dei dati acquisiti dall'Hobo, per ogni giorno della settimana dalle 8.20 alle 12.20 e per le due aule sono stati calcolati valori massimi, minimi, media e deviazione standard (quantifica la variazione di una serie di valori dalla media aritmetica di quella serie) di temperatura, CO₂ e umidità relativa (RH) come illustrato nella tabella sottostante Tabella 13.

	LUNEDI'		MARTEDI'		MERCOLEDI'		GIOVEDI'		VENERDI'	
	22/5		23/5		24/5		25/5		26/5	
	F	R	F	R	F	R	F	R	F	R
CO ₂ max [ppm]	1214	1481	1490	864	1317	1261	1917	807	894	1001
CO ₂ min [ppm]	681	487	857	458	898	442	683	444	578	466
CO ₂ avg [ppm]	1000	1007	1127	661	1049	679	944	589	701	711
DEV ST CO ₂	85	291	122	78	116	231	262	112	67	174
Ta, i max (°C)	23	21	24	23	25	23	25	24	25	24
Ta, i min (°C)	21	18	21	20	22	21	23	21	23	21
Ta, i avg (°C)	22	20	23	21	24	22	24	22	24	23
DEV ST Ta, i	0,61	0,84	0,6	0,9	0,6	0,8	0,4	0,6	0,4	0,6
RH max (%)	71	79	68	68	68	65	73	72	67	69
RH min (%)	68	74	61	62	65	58	69	54	65	65
RH avg (%)	69	77	63	65	66	62	71	64	66	67
DEV ST RH	0,810	1,240	2,2	1,7	0,8	1,8	0,9	5,8	0,5	1,1

Tabella 13_Massimi, minimi, media e deviazione standard di CO₂, Temperatura e Umidità relativa valutati per ogni giorno per entrambe le scuole dalle 8.20 alle 12.20

Dalla Tabella 13 si nota che il livello medio di CO₂, eccetto per il lunedì e venerdì è sempre maggiore a Falconara che a Recanati e come detto in precedenza il valore minimo di CO₂ non scende mai sotto i 578 ppm a Falconara. Anche la temperatura media per tutti i giorni a Falconara è più alta di quella di Recanati a sostegno di quanto detto nel commento al grafico in Figura 58.

Di seguito un grafico, Figura 59 che propone gli andamenti di temperatura e anidride carbonica suddivisi per giorni e analizzando entrambe le scuole dalle 8.20 alle 12.20. In questo modo è più semplice effettuare un'analisi comparativa sia tra le aule che tra gli andamenti dei dati da un giorno all'altro.

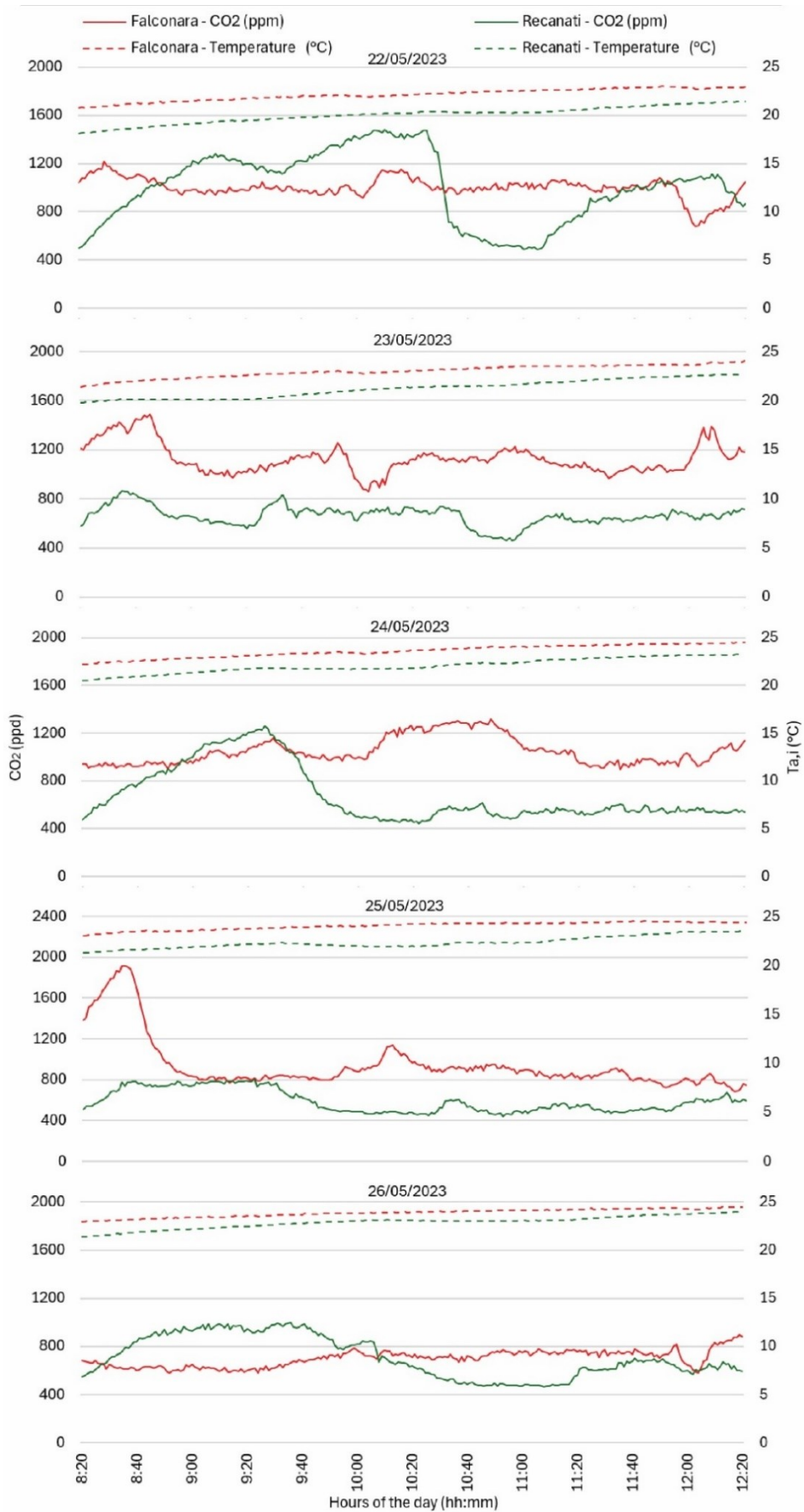


Figura 59_ Andamento di CO₂ e Temperatura dalle 8.20 alle 12:20 per ogni giorno della settimana dal 22 al 26 maggio per le scuole di Recanati e Falconara

Da questo confronto, tenendo in considerazione che è stata valutata solo la fascia oraria della mattina e che quindi la scuola di Falconara ha altre ore di lezione, oltre a quelle analizzate, si può notare che la temperatura durante l'arco della mattina va aumentando in modo graduale e di pochi gradi per entrambe le scuole e si nota una temperatura maggiore a Falconara rispetto che a Recanati, come già detto in precedenza.

I valori di anidride carbonica invece per la scuola di Recanati sono simili per la maggior parte dei giorni della settimana in quanto si registra un graduale aumento della CO₂ fino alle 9.40 circa, poi subisce un decadimento molto graduale fino ad arrivare a livelli di circa 430 ppm, segno del fatto che probabilmente gli studenti escono dall'aula, rimane a 430 ppm per alcuni minuti e poi risale gradualmente.

Il 24 maggio nello specifico, a Recanati si registra un aumento di CO₂ fino alle 9.40 circa, per poi diminuire progressivamente ed arrestarsi a livelli di 430 ppm fino alle 10.30 e per poi riprendere ad alzarsi di poco sopra i 430 ppm. Probabilmente in questo giorno gli alunni non erano in classe le ore successive alle prime in quanto a Recanati si svolgono molti laboratori esterni all'aula.

Anche il 25 maggio Recanati ha lo stesso andamento del 24 con una salita di CO₂, un pianerottolo costante a circa 749 ppm, e un decadimento graduale fino ad arrestarsi a 430 ppm intorno alle 10.00 per poi risalire intorno ai 500 ppm e mantenersi a questo valore fino alla fine delle lezioni della mattina. Anche in questo caso il motivo è forse da attribuire allo svolgimento di laboratori fuori dall'aula.

Anche il giorno 26 il livello di CO₂ della scuola di Recanati sale e rimane costante fino alle 9.40, decresce gradualmente fino ad arrestarsi a circa 430 ppm tra le 10.40 e le 11.15 per poi risalire gradualmente fino a livelli di 600 ppm.

Per la scuola di Falconara non è semplice valutare una somiglianza tra gli andamenti dei livelli di CO₂ tra i vari giorni in quanto questa oscilla molto in momenti diversi della mattina e il livello non si abbassa mai sotto i 430 ppm.

Analisi su tutta la giornata

Per i motivi di cui si è discusso al paragrafo precedente, in seguito si è proceduto ad indagare le due scuole per tutto l'arco della giornata dalle ore 8.00 alle ore 19.00, per avere una visione dell'intera giornata e capire gli andamenti di CO₂ su tutto il giorno dato che precedentemente non si erano considerate le ore pomeridiane della scuola di Recanati ed è stata valutata solo una parte dell'orario scolastico della mattina per Falconara.

In questo caso però non sono stati inseriti gli andamenti di temperatura e anidride carbonica registrati nelle due aule nello stesso grafico ma si è preferito avere una visualizzazione separata di ciò che accade nei due ambienti Figura 60 e Figura 61.



Figura 60_ Andamento di CO₂ e Temperatura dalle 8.00 alle 19.00 per ogni giorno della settimana dal 22 al 26 maggio per la scuola di Falconara

Per la scuola di Falconara sono illustrati gli andamenti di temperatura dell'aria e CO₂ nei grafici in Figura 60. Nella scuola si svolgono le lezioni dalle 8.00 alle 13.45, ciò che si nota per tutti i giorni è che alle 8 c'è un'impennata repentina del livello di CO₂ segno che gli studenti sono entrati in classe, non è possibile capire quando gli studenti fanno ricreazione perché l'anidride carbonica non scende mai sui 430 ppm quindi probabilmente gli alunni fanno ricreazione in classe. Alle 13.45 orario di fine lezioni l'anidride carbonica cala a picco fino a livelli di 430 ppm eccetto per il giorno 23 maggio in cui forse qualcuno entra nell'aula e ci rimane fino a circa le 16.00.

Lunedì 22 fino alle 8:45 circa l'anidride carbonica sembra aumentare, poi decade fino alle 9:00 e si stabilizza a circa 1000 ppm fino alle 10:15, successivamente si rialza a 1100 ppm e intorno alle 12:15 si nota un decadimento che ci induce a pensare che forse sia stata aperta la finestra o la portafinestra in quanto poi la CO₂ risale subito con un picco che sfiora i 1200 ppm e poi riscende a 900 ppm per poi decadere al momento dell'uscita degli studenti.

Il 23 fino alle 8:45 la CO₂ sale ed arriva a 1490 ppm poi decade a picco e lentamente risale fino alle 10:00. A quest'ora si registra un decadimento a picco fino a quasi 800 ppm che ci fa pensare all'apertura di una finestra perché poi il livello di CO₂ risale subito e si mantiene quasi costante a 1100 ppm. Alle 12:00 si registra un altro picco di CO₂ fino a 1400 ppm e dopo di ciò l'anidride carbonica inizia a calare molto gradualmente fino all'uscita degli studenti in cui c'è un decadimento a picco.

Il 24 maggio la CO₂ sale a picco quando gli studenti entrano in classe e poi continua a salire molto gradualmente con un primo picco che sfiora i 1200 ppm alle 9:30, subito dopo decade e rimane per un breve periodo costante a 1000 ppm per poi risalire sopra i 1200 ppm alle 10:15. Si mantiene a questo valore fino alle 10:50 e poi c'è un decadimento che riporta la CO₂ a poco più di 800 ppm. Tra le 12:00 e le 13:30 l'anidride carbonica sale gradualmente per poi andare a decrescere quando gli studenti lasciano l'aula.

Il 25 la CO₂ sale in modo repentino e raggiunge i 1917 ppm alle 8:30 poi riscende a picco alle 9:00 e rimane costante a 800 ppm durante tutta la mattinata eccetto per un picco alle 10:15 di 1100 ppm circa. In generale in questo giorno non si registrano apprezzabili variazioni di CO₂ a parte il picco iniziale.

Il giorno 26 la CO₂ rimane sempre sotto gli 800 ppm fino alle 12:00 momento in cui si registra un decadimento a picco fino a circa 600 ppm, poi l'anidride carbonica si alza sopra gli 800 ppm e intorno alle 12:45 decade a 430 ppm. Questo ci induce a pensare che gli studenti escono dalla classe un'ora prima.

In generale quello che si nota per tutti i giorni è che tra l'arrivo degli studenti la mattina alle 8:00 e la loro uscita alle 13:45 non si nota visivamente, dagli andamenti della CO₂, una ricorrenza ovvero non si registrano decadimenti di CO₂ che ci fanno pensare all'uscita degli studenti per la ricreazione o decadimenti dovuti al cambio dell'ora in cui vengono di solito aperte le finestre e dunque la CO₂ decade.

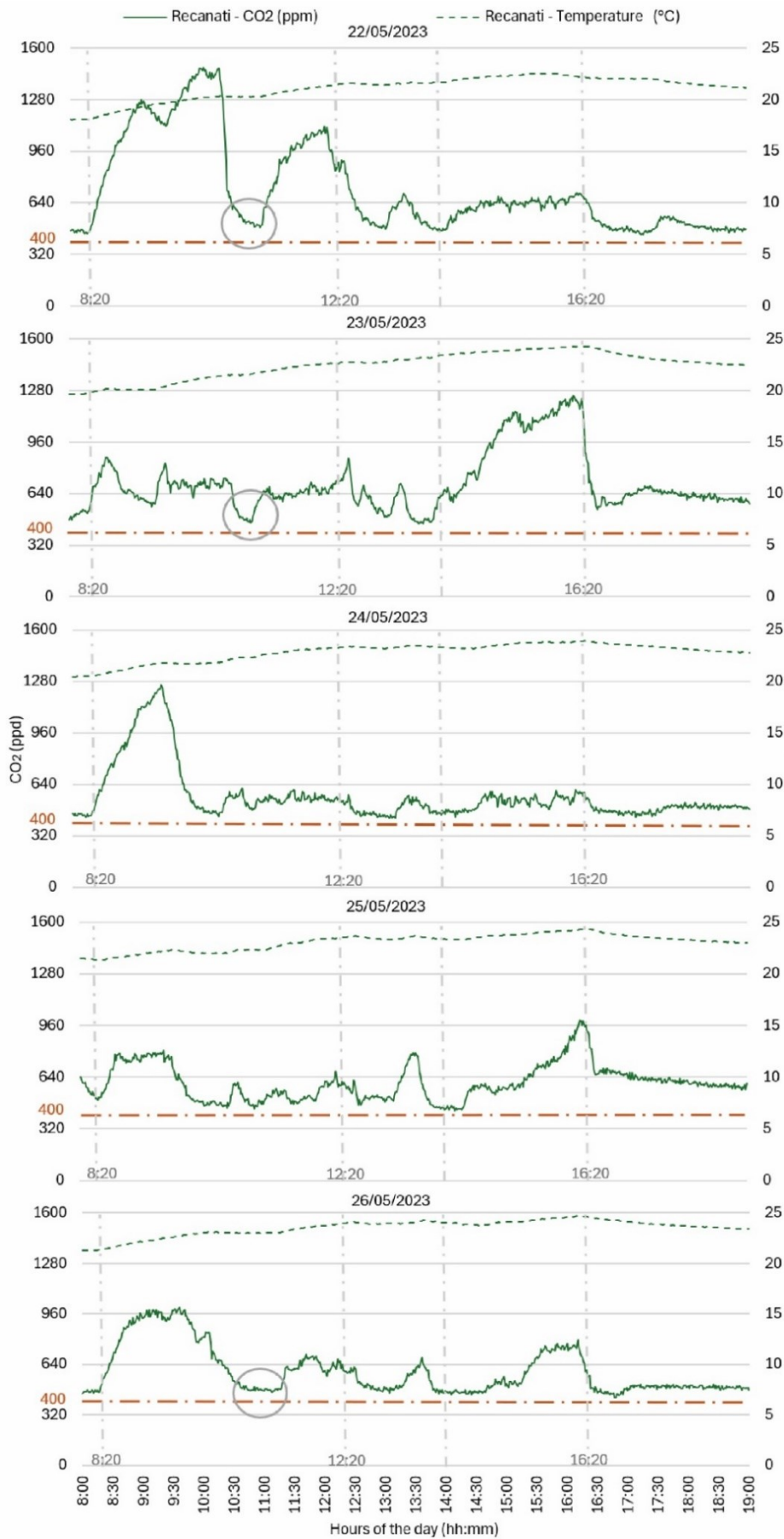


Figura 61 _ Andamento di CO₂ e Temperatura dalle 8.00 alle 19.00 per ogni giorno della settimana dal 22 al 26 maggio per la scuola di Recanati

Per la scuola di Recanati, le lezioni iniziano alle 8.20 e proseguono fino alle 12.20 al mattino, tra le 12.20 e le 14.00 gli alunni sono a mensa e dunque non sono presenti in classe e nel pomeriggio le lezioni riprendono dalle 14:00 alle 16:20. Gli andamenti di anidride carbonica e temperatura di tutti i giorni della settimana per la scuola di Recanati sono stati illustrati nei grafici sopra in Figura 61 e verranno commentati nel seguito.

Il 22 maggio dalle 8:20 alle 9:00 si nota un graduale aumento di CO₂, alle 9:20 decade segno del fatto che probabilmente c'è un cambio d'ora e forse viene aperta la porta e la finestra, dopo ciò l'anidride carbonica torna a salire registrando un picco alle 10:20 di 1481 ppm e subisce un drastico decadimento a picco che sfiora i 466 ppm indice del fatto che sono state aperte le finestre e probabilmente c'è una ricreazione. Successivamente fino alle 12:00 circa la CO₂ sfiora i 1100 ppm per poi decadere perché gli studenti escono dall'aula. Durante la pausa pranzo la CO₂ registra valori bassi eccetto un picco registrato alle 13:15 perché probabilmente qualche collaboratore scolastico entra a sistemare l'aula. Nel pomeriggio alle 14:00 quando gli studenti rientrano in aula c'è un aumento graduale di CO₂ fino a livelli di 640 ppm e si mantiene a questi valori fino all'uscita degli studenti.

Il 23 maggio la CO₂ sale dalle 8:20, ha un picco a 900 ppm alle 9:00 e poi decresce forse per l'apertura delle finestre. Successivamente sale e rimane stabile a 700 ppm circa. Alle 10:20 c'è un decadimento a picco che ci fa pensare a una ricreazione perché il livello di CO₂ scende molto e dopo la ricreazione la CO₂ torna costante a 640 ppm. Al momento dell'uscita degli studenti alle 12:20 la CO₂ subisce un decremento e come per il 22 anche in questo caso durante la pausa pranzo intorno alle 13:00 c'è un aumento di anidride carbonica forse dovuta al fatto che qualcuno entra a sistemare l'aula. Nel pomeriggio dalle 14:00 la CO₂ ricomincia a salire e questa volta raggiunge livelli molto alti oltre i 1200 ppm e alle 16:20 decade perché gli studenti escono.

Il 24 maggio al momento dell'entrata in classe degli studenti si registra un graduale aumento di anidride carbonica che arriva a 1261 ppm alle 9:15. Dopo tale orario la CO₂ scende e rimane stabile intorno a 600 ppm fino al decadimento alle 12:20 perché gli studenti escono dall'aula. Nel pomeriggio alle 14:15 l'andamento della CO₂ torna a salire ma i livelli rimangono intorno ai 600 ppm e scende quando alle 16:20 gli studenti vanno via.

Il 25 maggio l'anidride carbonica sale quando gli studenti entrano in classe e per un periodo di circa un'ora si mantiene costante a 800 ppm, probabilmente dopo la prima ora gli studenti escono perché il livello di CO₂ è basso e dopo le 10:30 ricomincia ad aumentare, ma non va mai oltre i 650 ppm, per poi decadere alle 12:20. Durante la pausa pranzo alle 13:30 si registra un picco di CO₂ perché probabilmente qualcuno entra in classe. Nel pomeriggio dalle 14:30 la CO₂ si alza e arriva ad un picco massimo di 995 ppm alle 16:20 prima che gli studenti escono.

Il 26 maggio si nota un incremento di CO₂ da quando gli studenti entrano in aula poi questa rimane stabile a 960 ppm fino alle 9:45 circa, successivamente si ha un decremento di CO₂ fino alle 10:30 momento in cui si stabilizza a 450 ppm. Fino alle 11:15 la CO₂ rimane intorno ai 450 segno che nessuno è in aula per poi riprendere a crescere intorno ai 640 ppm fino all'uscita degli studenti alle 12:20. Tra le 12:20 e le 14:45 la CO₂ rimane molto bassa eccetto alle 13:00 quando si registra un picco isolato segno che qualcuno è entrato in aula. Nel pomeriggio la CO₂ sembrerebbe iniziare a crescere alle 14:45 dunque gli studenti forse la prima ora fanno qualche laboratorio fuori dall'aula, quando gli studenti rientrano in classe la CO₂ sale a valori di circa 800 ppm fino al momento della loro uscita.

Ciò che è stato possibile notare da queste analisi è stato che per 3 giorni su 5 ricorre un abbassamento significativo di CO₂ intorno alle 10:20 segno che probabilmente gli alunni escono dall'aula per fare ricreazione.

	LUNEDI' 22/5		MARTEDI' 23/5		MERCOLEDI' 24/5		GIOVEDI' 25/5		VENERDI' 26/5	
	F	R	F	R	F	R	F	R	F	R
CO ₂ max [ppm]	1214	1481	1490	1247	1317	1261	1917	995	894	1001
CO ₂ min [ppm]	486	466	489	458	478	436	446	433	477	449
CO ₂ avg [ppm]	954	864	1063	779	1033	623	893	609	662	665
DEV ST CO ₂	126	299	161	206	155	199	245	128	103	166
Ta, i max (°C)	23	23	24	24	25	24	25	24	25	25
Ta, i min (°C)	20	18	21	20	21	21	22	21	22	21
Ta, i avg (°C)	22	21	23	22	24	23	24	23	24	23
DEV ST Ta, i	0,8	1,3	0,9	1,5	0,9	1,0	0,5	0,9	0,5	0,8
RH max (%)	72	79	68	68	69	65	73	72	67	69
RH min (%)	67	63	61	62	63	54	62	54	63	55
RH avg (%)	70	73	63	64	67	60	70	61	66	64
DEV ST RH	0,9	5,3	1,9	1,5	1,2	2,6	2,1	5,8	0,7	3,9

Tabella 14_Massimi, minimi, media e deviazione standard di CO₂, Temperatura e Umidità relativa valutati per ogni giorno dalle 8.00 alle 14.00 per la scuola di Falconara e dalle 8.20 alle 12.20 e 14.00 alle 16.20 per la scuola di Recanati

In generale dopo aver condotto l'analisi sulle due aule per tutto l'arco della giornata si può affermare che la CO₂ è sempre maggiore a Falconara che a Recanati in cui si registrano valori tendenzialmente più bassi. Dalla Tabella 14 si può notare che la CO₂ raggiunge livelli più elevati il 22 e il 26 a Recanati rispetto che a Falconara mentre gli altri giorni il massimo valore si ha sempre a Falconara, i valori minimi di anidride carbonica, come già detto nei paragrafi precedenti, sono sempre minori a Recanati mentre a Falconara non scende mai sotto i 446 ppm. Si precisa che tale tabella fa riferimento agli orari scolastici in cui le due scuole offrono servizio agli studenti.

Analisi in frequenza

Si è proceduto ad analizzare le due scuole con un'analisi in frequenza ovvero sono state prese per entrambe le scuole sei fasce orarie di 60 minuti l'una in modo da avere 60 valori di CO₂ (perché l'Hobo acquisisce ogni minuto); per Recanati dalle 8.20 alle 12.20 ovvero 4 fasce orarie e dalle 14.00 alle 16.00, 2 fasce orarie; per Falconara dalle 8.00 alle 14.00 ovvero 6 fasce orarie.

È stato preso come valore di CO₂ di riferimento esterno 430 ppm e dunque per ogni giorno della settimana e per ogni fascia oraria in cui il valore scendeva al di sotto di quella soglia si è proceduto ad incrementarlo per arrivare al valore limite.

I valori di CO₂ sono stati divisi in range:

- ppm ≤ 650
- 651 < ppm < 1000
- 1001 < ppm < 1350
- 1351 < ppm < 1700
- ppm ≥ 1700

I range vanno ogni 350 ppm in modo tale da ottenere nei range il limite da OMS corrispondente a 1000 ppm e il limite della normativa EN 16798-1:2019 corrispondente a 1350 ppm.

Da questa suddivisione, in ogni giorno i livelli di CO₂ corrispondenti ai range si ripetono con una frequenza diversa a seconda della fascia oraria.

Di seguito viene riportata una tabella che illustra l'analisi in frequenza effettuata sulla scuola di Falconara.

GIORNO VALORI PPM		FALCONARA					
		Fascia oraria					
		8.00-9.00	9.00-10.00	10.00-11.00	11.00-12.00	12.00-13.00	13.00-14.00
22-mag	≤650	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,67%	16,67%
	651-1000	41,67%	98,33%	66,67%	75,00%	71,67%	83,33%
	1001-1350	53,33%	1,67%	33,33%	25,00%	26,67%	0,00%
	1351-1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	≥1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23-mag	≤650	8,33%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	13,33%
	651-1000	10,00%	45,00%	20,00%	60,00%	48,33%	86,67%
	1001-1350	68,33%	55,00%	80,00%	40,00%	51,67%	0,00%
	1351-1700	13,33%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	≥1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
24-mag	≤650	6,67%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	16,67%
	651-1000	93,33%	68,33%	8,33%	83,33%	21,67%	38,33%
	1001-1350	0,00%	31,67%	91,67%	16,67%	78,33%	45,00%
	1351-1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	≥1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25-mag	≤650	3,33%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	21,67%
	651-1000	31,67%	100,00%	85,00%	100,00%	100,00%	78,33%
	1001-1350	26,67%	0,00%	15,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	1351-1700	20,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	≥1700	18,33%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
26-mag	≤650	100,00%	76,67%	11,67%	5,00%	46,67%	100,00%
	651-1000	0,00%	23,33%	88,33%	95,00%	53,33%	0,00%
	1001-1350	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	1351-1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	≥1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabella 15_Frequenze corrispondenti ai range di CO₂ per ogni giorno della settimana dal 22 al 26 maggio per la scuola di Falconara

Grazie all'analisi in frequenza è stato possibile valutare i momenti della giornata in cui i livelli di anidride carbonica scendono e dunque ipotizzare quando si effettua la ricreazione. Va sottolineato che

per la scuola di Falconara rispetto che per Recanati in generale i livelli di CO₂ sono più elevati come già visto nei paragrafi precedenti.

I giorni 22, 23 e 24 maggio hanno tutti lo stesso andamento ovvero la prima ora dalle 8.00 alle 9.00 si registrano valori in frequenza elevati nei range di CO₂ tra 651-1000 ppm e 1001-1350 ppm questo ci indica che gli studenti sono in classe e fanno lezione. Tra le 9.00 e le 10.00 e le 11.00 e le 12.00, si verifica un decremento dei livelli di CO₂ quindi abbiamo intuito che probabilmente c'è la ricreazione o viene aperta la porta o la finestra. In questo caso si ipotizza che gli alunni fanno due ricreazioni dato che effettuano durante la mattinata 5 ore e 45 minuti di lezioni. Tra le 12.00 e le 13.00 la CO₂ risale gradualmente, mentre l'ultima ora dalle 13.00 alle 14.00 si assiste a un progressivo calo di CO₂ con un incremento della frequenza percentuale del range di CO₂ minore di 650 ppm.

Il giorno 25 maggio ha lo stesso andamento dei primi tre giorni della settimana fino alle ore 11.00, infatti dalle 11.00 alle 13.00 i valori di anidride carbonica sembrerebbero costanti con una percentuale del 100% in frequenza sul range 651-1000 ppm.

Il 26 maggio invece ha valori di CO₂ molto bassi rispetto gli altri giorni e risulta la prima ora il 100% in frequenza nel range di CO₂ minore di 650. La seconda ora dalle 9.00 alle 10.00 si nota un graduale aumento di CO₂ e l'aumento continua a persistere fino alle 12.00. Tra le 12.00 e le 13.00 si nota un incremento di CO₂ percentuale nel range più basso, cioè quello minore di 650 ppm. Come detto nel paragrafo precedente forse il 26 maggio gli alunni sono usciti un'ora prima in quanto dalle 13.00 alle 14.00 si registrano livelli di CO₂ poco superiori a 430 ppm. La Tabella 15 e la Figura 62 illustrano quanto detto sopra.

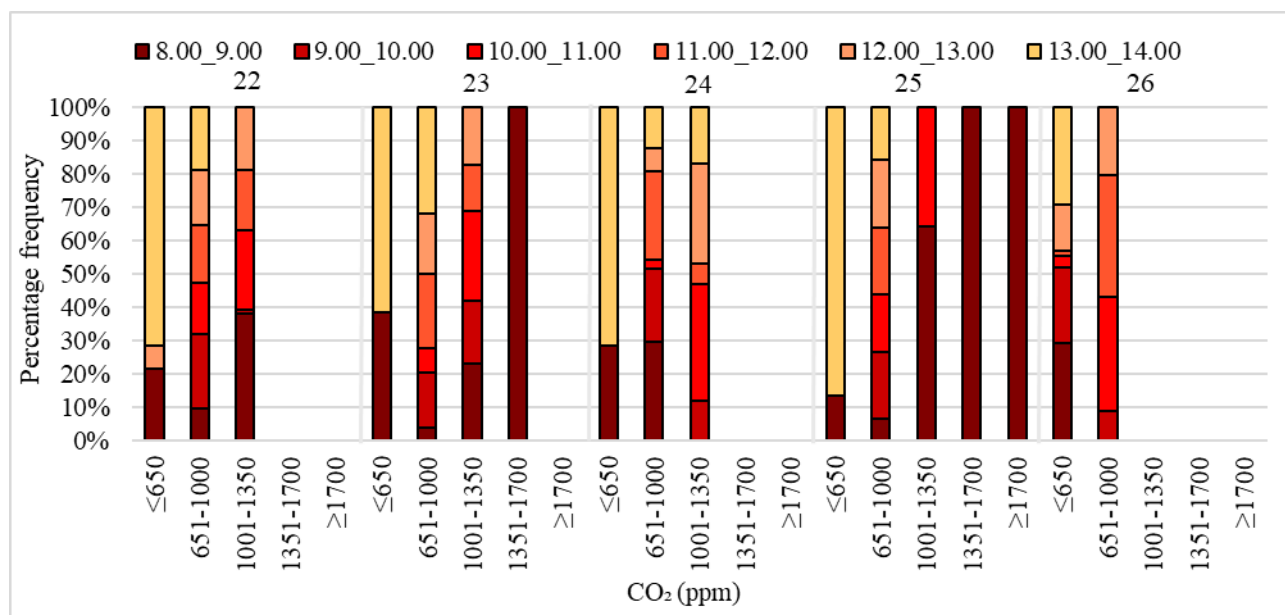


Figura 62_Grafico delle frequenze percentuali di tutti i giorni della settimana dal 22 al 26 maggio per la scuola di Falconara

È stata effettuata l'analisi in frequenza anche per l'aula di Recanati e i dati ricavati sono riportati nel seguito.

GIORNO	VALORI PPM	FASCIA ORARIA					
		RECANATI					
		8.20_9.20	9.20_10.20	10.20_11.20	11.20_12.20	14.00_15.00	15.00_16.00
22-mag	≤650	11,67%	0,00%	66,67%	0,00%	100%	100%
	651-1000	38,33%	0,00%	16,67%	63,33%	0%	0%
	1001-1350	50,00%	58,33%	6,67%	36,67%	0%	0%
	1351-1700	0,00%	41,67%	10,00%	0,00%	0%	0%
	≥1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0%	0%
23-mag	≤650	55,00%	23,33%	71,67%	78,33%	33,33%	0,00%
	651-1000	45,00%	76,67%	28,33%	21,67%	61,67%	3,33%
	1001-1350	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	5,00%	96,67%
	1351-1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	≥1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
24-mag	≤650	16,67%	56,67%	100,00%	100,00%	100%	100%
	651-1000	50,00%	16,67%	0,00%	0,00%	0%	0%
	1001-1350	33,33%	26,67%	0,00%	0,00%	0%	0%
	1351-1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0%	0%
	≥1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0%	0%
25-mag	≤650	15,00%	76,67%	100,00%	98,33%	100%	43%
	651-1000	85,00%	23,33%	0,00%	1,67%	0%	57%
	1001-1350	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0%	0%
	1351-1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0%	0%
	≥1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0%	0%
26-mag	≤650	15,00%	11,67%	100,00%	75,00%	100,00%	46,67%
	651-1000	85,00%	88,33%	0,00%	25,00%	0,00%	53,33%
	1001-1350	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	1351-1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	≥1700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabella 16_Frequenze corrispondenti ai range di CO₂ per ogni giorno della settimana dal 22 al 26 maggio per la scuola di Recanati

Ciò che si può dedurre dalla Tabella 16 e dalla Figura 63 è che per 3 giorni su 5 della settimana (22, 23, 26 maggio) si nota che per le prime due fasce orarie dalle 8.20 alle 10.20 i livelli di CO₂ sono elevati e arrivano anche fino al range compreso tra 1351 e 1700 ppm. Questo ci induce a pensare che gli alunni le prime due ore sono sicuramente presenti in aula data l'elevata concentrazione di anidride carbonica. La terza ora dalle 10.20 alle 11.20 quasi sicuramente gli alunni fanno ricreazione in quanto le frequenze percentuali associate al range di CO₂ minore di 650 ppm sono molto elevate. L'ultima ora della mattina dalle 11.20 alle 12.20 si registra un lieve aumento di CO₂.

Per i giorni 24 e 25 maggio invece, come detto precedentemente, durante la valutazione degli andamenti di CO₂, nella prima ora si notano livelli fino a 1000 ppm mentre la seconda ora l'anidride carbonica scende gradualmente e dalle 10.20 alle 12.20 il livello è basso con una frequenza al 100% sotto i 650 ppm. Questo è dovuto al fatto che probabilmente dopo la prima ora gli studenti si recano in qualche laboratorio e la seconda ora diminuisce la percentuale in frequenza nel range 651-1000 ppm e aumenta la frequenza percentuale <651 ppm.

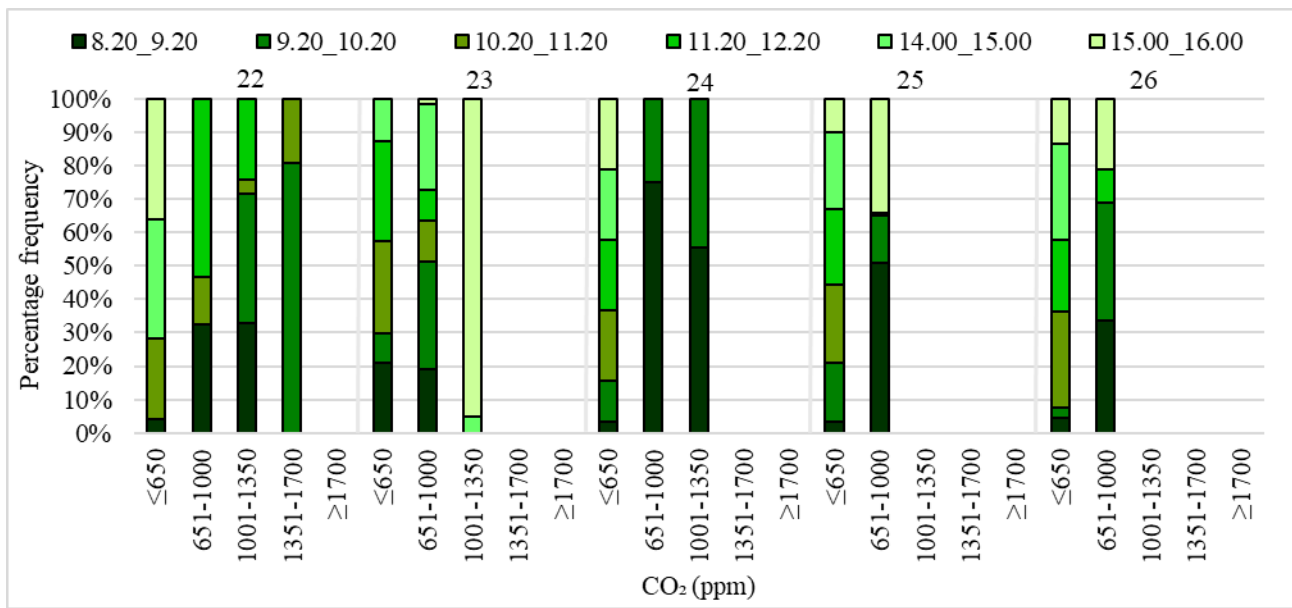


Figura 63_Grafico delle frequenze percentuali di tutti i giorni della settimana dal 22 al 26 maggio per la scuola di Recanati

4.3.2 Analisi comportamento utente

Falconara

Di seguito verranno illustrati gli andamenti di tutti i dati ricavati dai sensori posti nell'aula 4 al piano primo della scuola di Falconara precedentemente illustrata nel capitolo relativo al metodo sull'analisi comportamento utente, giorno per giorno, dal 15 marzo al 21 marzo 2023, escluso il sabato e la domenica.

Per ogni giorno sono riportati due grafici, nel primo sono illustrati gli andamenti della CO₂ ricavata dall'acquisizione fatta con l'Hobo nell'aula, i dati di apertura e chiusura porta visualizzati come aree in grigio (la porta è aperta quando il grafico ha uno sfondo grigio e il sensore risulta in modalità "on" = 1 nel grafico) e l'apertura di tutte le finestre.

Nel secondo grafico, sono riportati oltre ai dati di apertura e chiusura porta e finestre, come per il primo grafico, anche la temperatura ricavata dall'acquisizione fatta con l'Hobo.

Ogni grafico riporta dati che vanno dalle 7:00 alle 19:00 perché è stato scelto di controllare l'intero arco della giornata lavorativa.

15 marzo 2023

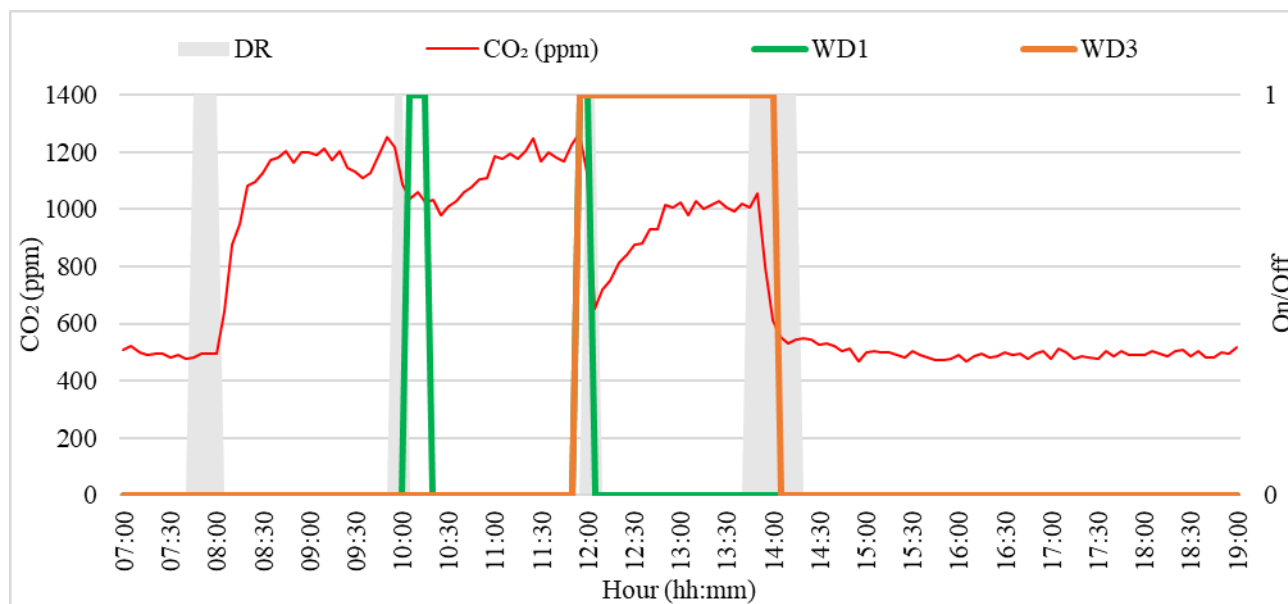


Figura 64 _Andamento CO₂ del 15 marzo 2023 nell'aula 4 di Falconara in funzione dell'apertura di porta e finestre

Dall'andamento dell'anidride carbonica si nota che questa subisce un incremento dopo l'ingresso degli studenti in aula alle 8:00, raggiunti i 1200 ppm e rimane costante fino alle 9:50 circa. In questo momento si ipotizza che ci sia una ricreazione, infatti, l'anidride carbonica subisce un decremento e viene aperta la porta quindi probabilmente gli studenti escono dall'aula e viene anche aperta la finestra 1. Dalle 10:30 in poi la CO₂ ricomincia a salire fino alle 11:50 circa. A quest'ora si ipotizza una seconda ricreazione o un cambio d'ora e quindi cambio insegnante, infatti, la porta viene aperta e vengono aperte la finestra 1 e 3. La finestra 1 verrà poi chiusa subito dopo mentre la 3 rimarrà aperta fino alle 14:00 circa. A seguito dell'apertura contemporanea delle 2 finestre la CO₂ decresce a picco sfiorando i 600 ppm e quando la porta viene chiusa ricomincia a salire gradualmente per stabilizzarsi a 1000 ppm fino alle 13:45 quando gli studenti escono dall'aula e la CO₂ decade di nuovo a picco.

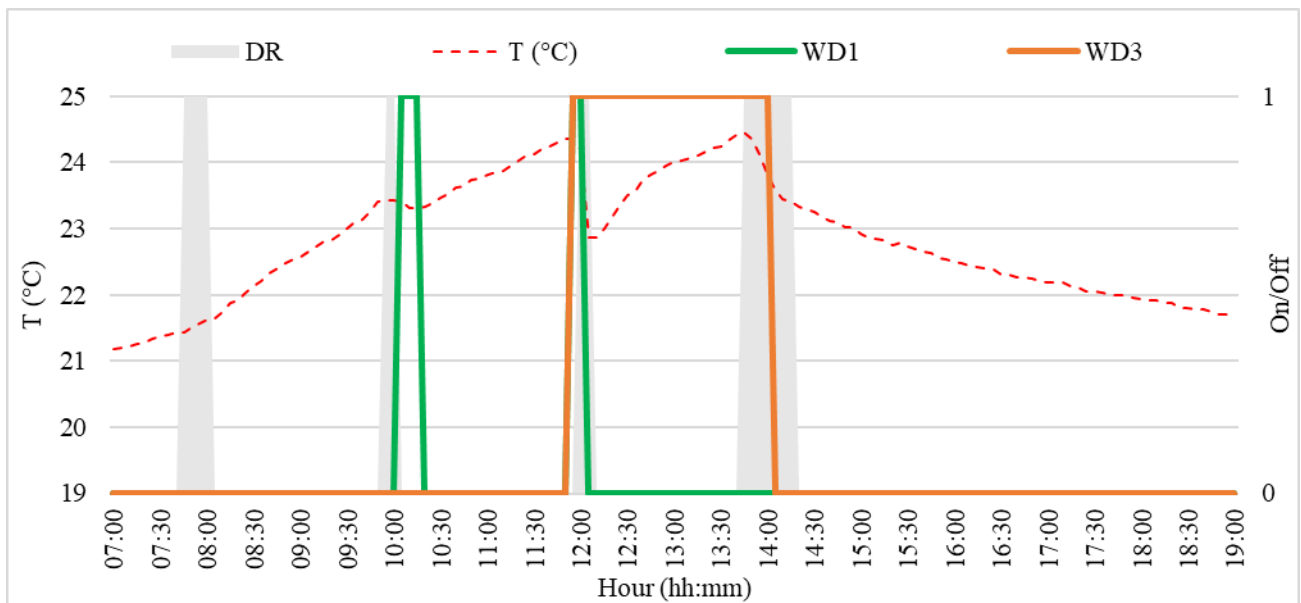


Figura 65 _Andamento Temperatura del 15 marzo 2023 nell'aula 4 di Falconara in funzione dell'apertura di porta e finestre

La temperatura da quando gli studenti entrano in classe alle 8:00 cresce in modo lineare, quando viene aperta la porta e la prima finestra arresta la sua crescita ma non diminuisce probabilmente perché viene aperta la finestra per circa 20 minuti. In seguito alla chiusura della finestra la temperatura continua a salire fino a quando viene aperta la porta e le finestre 1 e 3, qui si ha un decremento a picco della temperatura che passa da 24,5°C a meno di 23°C. La porta viene chiusa dopo pochi minuti insieme con la finestra 1 mentre la 3 rimane aperta quindi la temperatura torna a salire finché non viene aperta di nuovo la porta per permettere l'uscita degli studenti alle 13:45 e lì si ha un decremento di temperatura.

16 marzo 2023

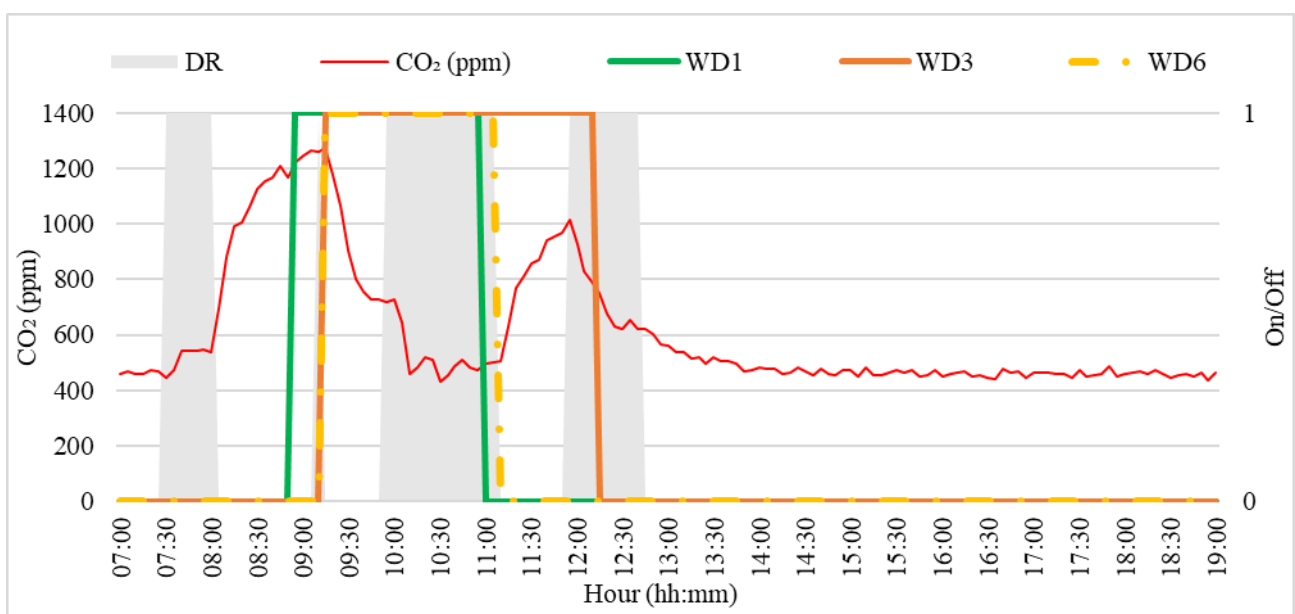


Figura 66 _Andamento CO₂ del 16 marzo 2023 nell'aula 4 di Falconara in funzione dell'apertura di porta e finestre

Il 16 marzo l'anidride carbonica è sotto i 600 ppm prima delle 8:00, da quando entrano gli studenti in aula inizia a salire velocemente e alle 9:00 raggiunge il livello massimo oltre i 1200 ppm. Alle 8:50

viene aperta la finestra 1 e alle 9:10 vengono aperte anche le finestre 3 e 6, questo provoca un decadimento repentino della CO₂ fino alle 10:30 circa, complice anche l'apertura della porta alle 9:50. Alle 11:00 viene chiusa la finestra 1 e alle 11:10 anche la finestra 2 e la porta si chiudono. La CO₂ trona così ad aumentare fino alle 11:50 quando viene aperta di nuovo la porta e così l'anidride carbonica scende di nuovo. Probabilmente gli studenti escono 2 ore prima dall'aula in quanto l'anidride dopo le 11:50 non raggiunge più livelli che inducono a pensare alla presenza di studenti in aula. In oltre la porta non viene più aperta dopo le 12:40.

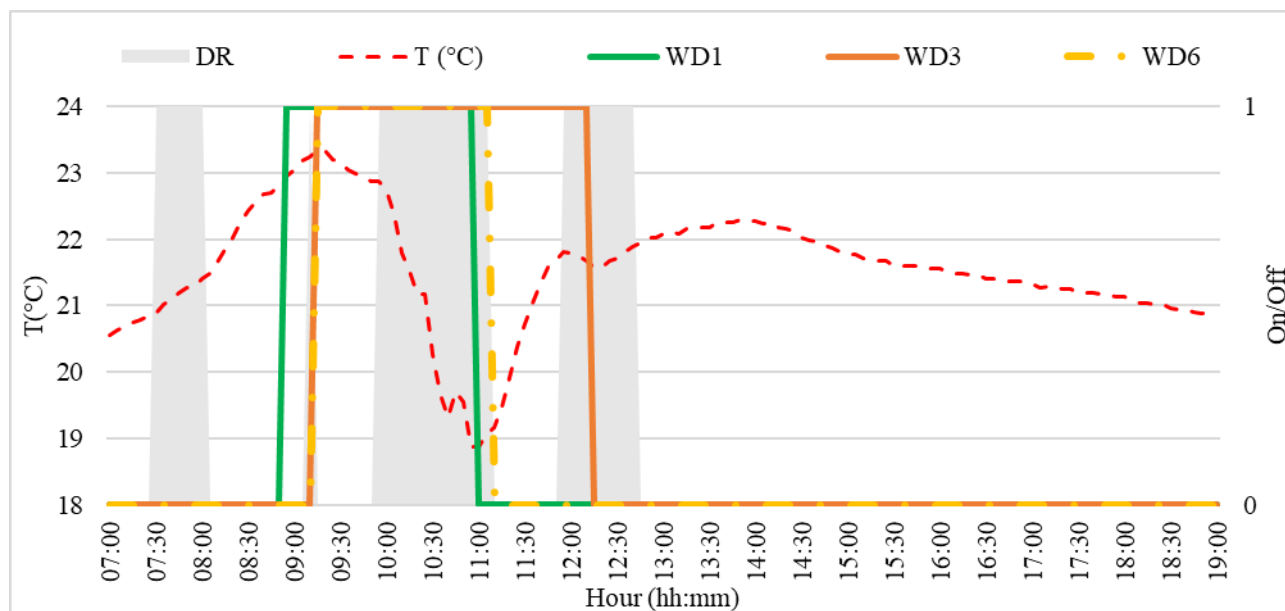


Figura 67 _Andamento Temperatura del 16 marzo 2023 nell'aula 4 di Falconara in funzione dell'apertura di porta e finestre

La temperatura sale gradualmente fino alle 9:10 arrivando oltre i 23°C, successivamente, influenzata dall'apertura delle finestre, decade a 19°C alle 11:00. A quest'ora le finestre vengono chiuse e la temperatura torna a salire finché non viene chiusa l'ultima finestra. Da lì in poi la temperatura è circa costante.

17 marzo 2023

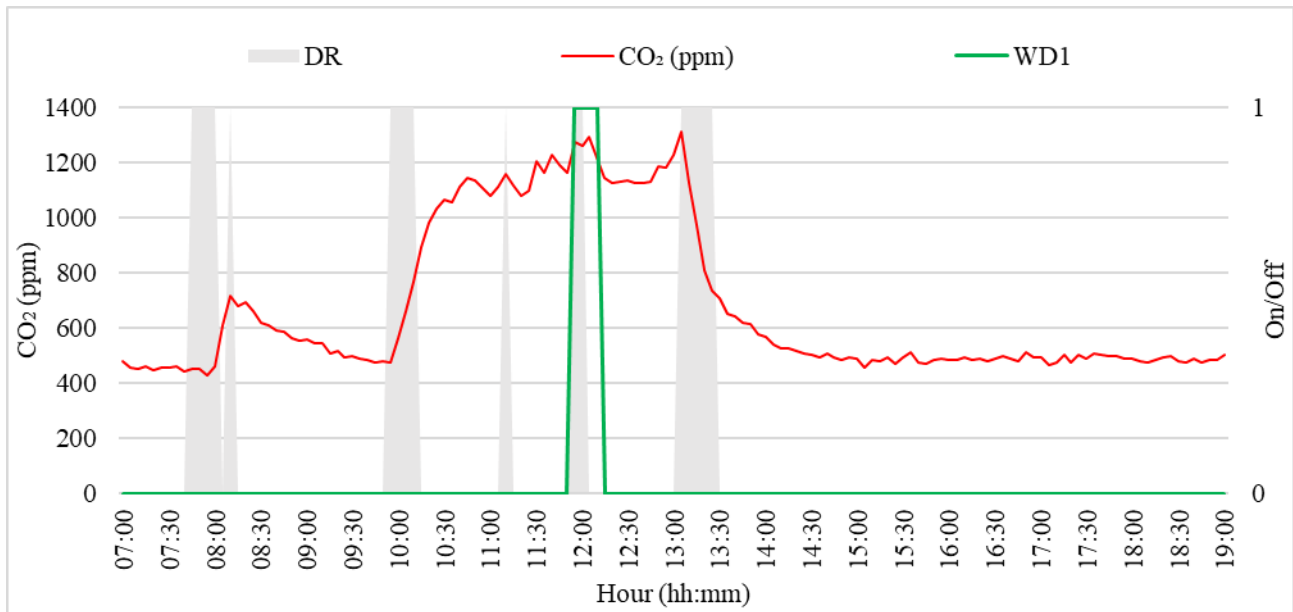


Figura 68 _Andamento CO₂ del 17 marzo 2023 nell'aula 4 di Falconara in funzione dell'apertura di porta e finestre

La CO₂ aumenta appena gli studenti entrano in classe alle 8:00, rimane per qualche minuto costante intorno ai 700 ppm poi decresce fino a valori inferiori a 500 ppm fino alle 10:00. Alle 9:50 si apre la porta segno che qualcuno sta rientrando in classe, infatti, l'anidride carbonica aumenta di nuovo e raggiunge il picco alle 12:00, ora in cui viene aperta la porta e anche la finestra 1 e probabilmente c'è il cambio dell'insegnante in questo momento della mattina. La CO₂ decresce di poco e poi risale fino alle 13:00. Dopo le 13:00 l'anidride carbonica decade gradualmente probabilmente perché gli studenti escono prima del normale orario di uscita, infatti, la porta si apre alle 13:00 e si chiude alle 13:30.

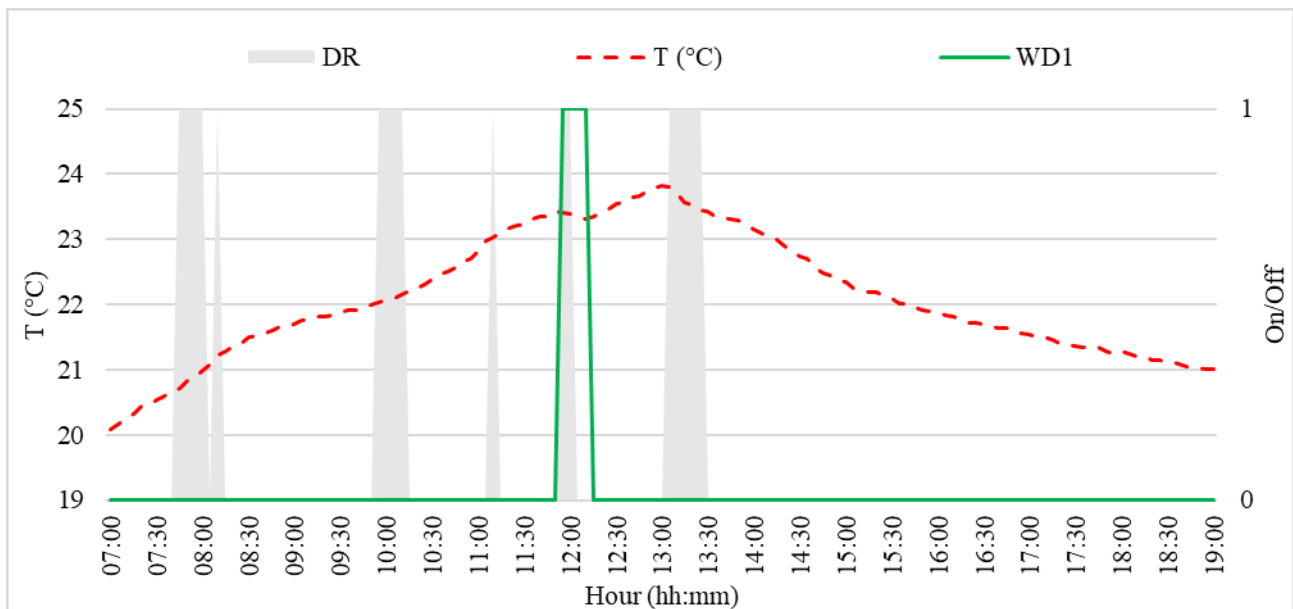


Figura 69 _Andamento Temperatura del 17 marzo 2023 nell'aula 4 di Falconara in funzione dell'apertura di porta e finestre

La temperatura cresce gradualmente dal mattino e raggiunge il picco alle 13:00 poco sotto i 24°C e poi scende lentamente dopo l'uscita degli studenti dalla classe. Si nota un arresto nella crescita della temperatura solo quando la finestra 1 viene aperta.

20 marzo 2023

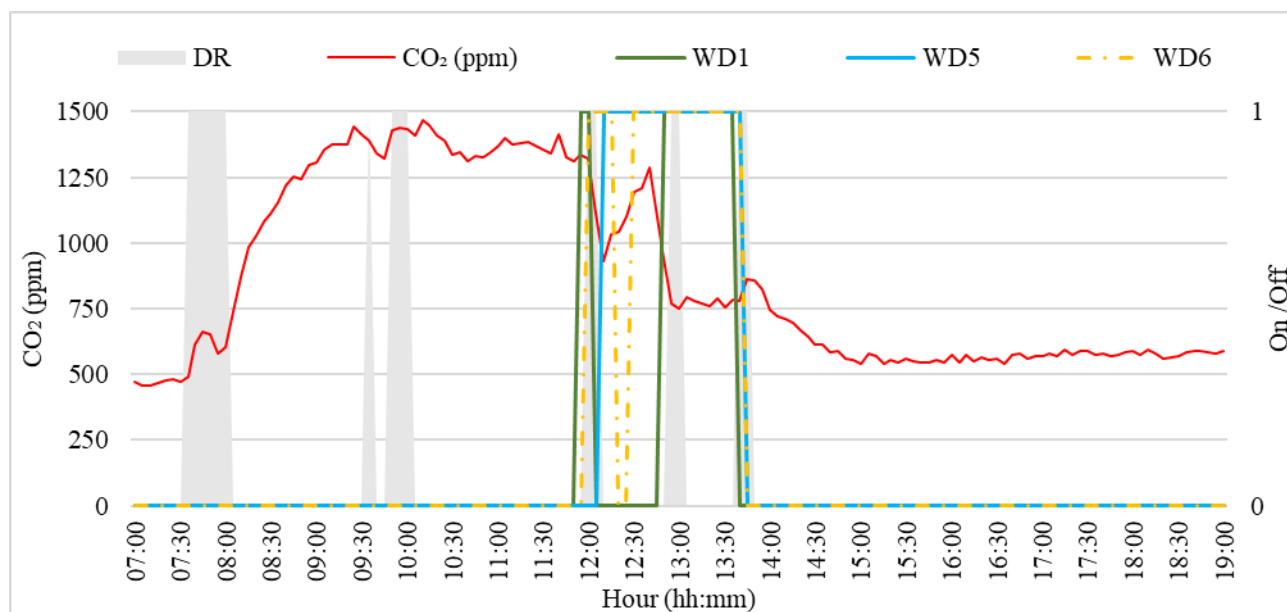


Figura 70 _Andamento CO₂ del 20 marzo 2023 nell'aula 4 di Falconara in funzione dell'apertura di porta e finestre

La CO₂ cresce gradualmente dalle 8:00 del mattino poi rimane costante con poche oscillazioni, probabilmente perché le finestre sono tutte chiuse, fino alle 11:45, momento in cui vengono aperte le finestre 1, 6 e 5. Queste aperture unite all'apertura della porta provoca un decadimento della CO₂. Non appena la porta e anche la finestra 1 vengono chiuse, l'anidride carbonica torna a salire. Riscende alle 12:40 perché viene aperta di nuovo la finestra 1. Alle 13:45 vengono chiuse tutte le finestre e gli studenti escono dall'aula perché c'è un decremento di CO₂.

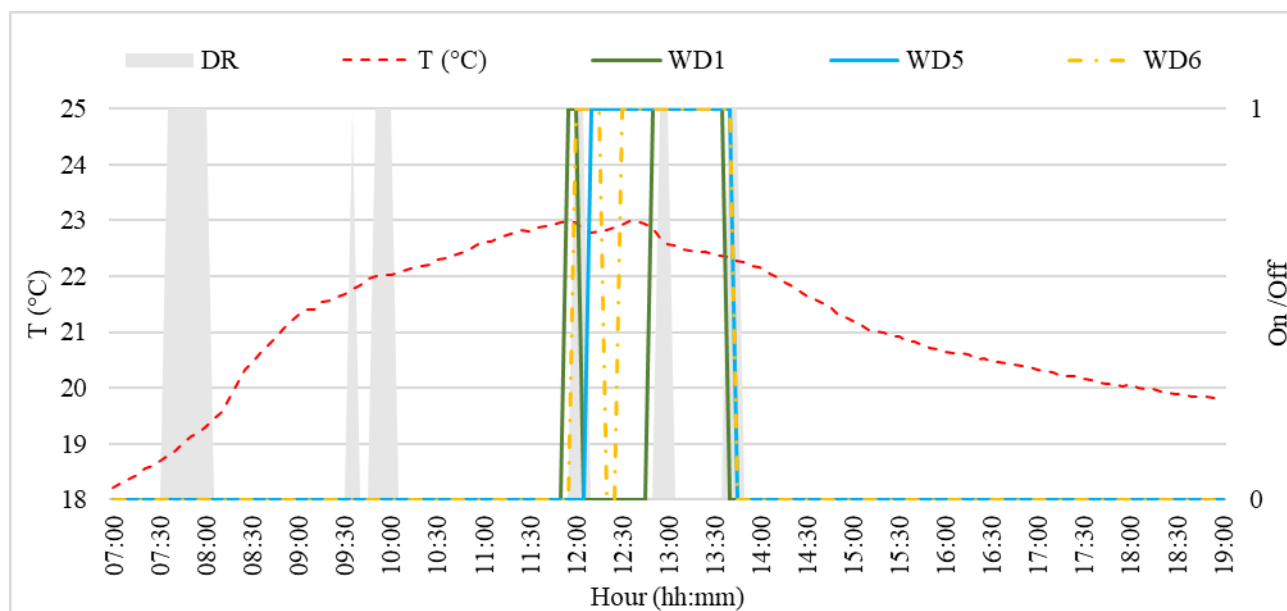


Figura 71 _Andamento temperatura del 20 marzo 2023 nell'aula 4 di Falconara in funzione dell'apertura di porta e finestre

La temperatura sale gradualmente fino alle 11:45, a quest'ora a causa dell'apertura di porta e finestre rimane costante a 23 °C e poi decresce fino all'uscita degli studenti.

21 marzo 2023

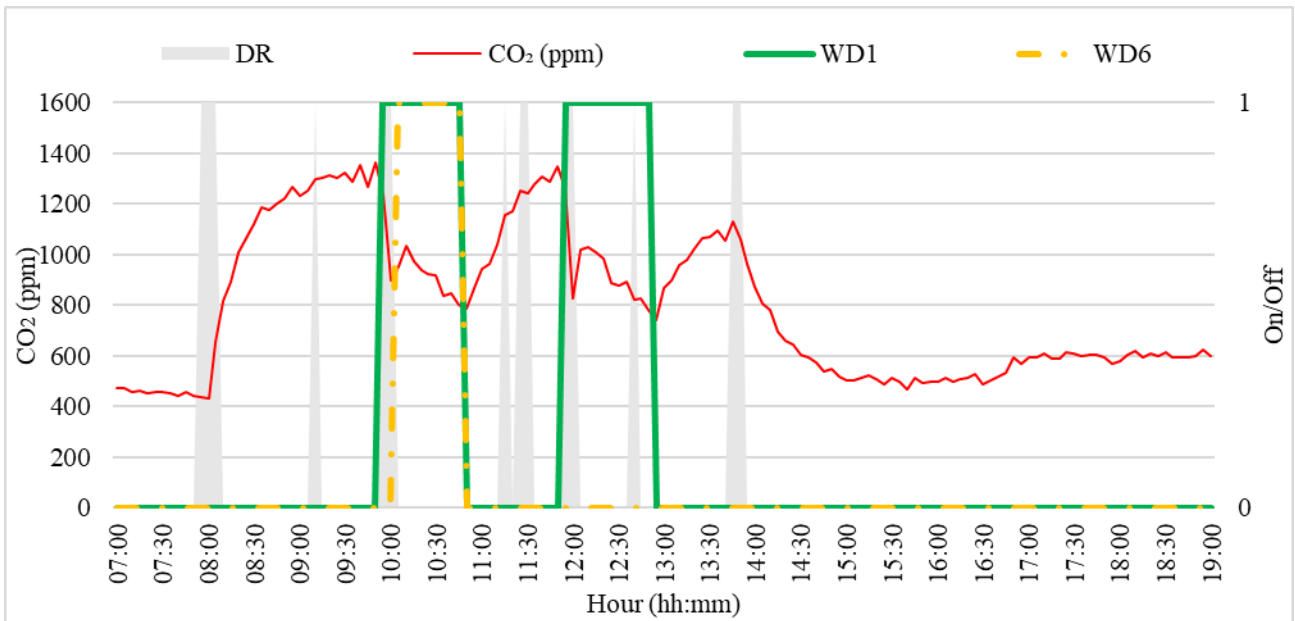


Figura 72_Andamento CO₂ del 21 marzo 2023 nell'aula 4 di Falconara in funzione dell'apertura di porta e finestre

Il 21 marzo, l'anidride carbonica cresce dopo le 8:00, si mantiene costante fino alle 9:50 ovvero il momento della ricreazione, qui vengono aperte finestre 1 e 6 e porta e questo determina un decremento di CO₂ fino alle 10:50 quando le finestre vengono chiuse. La CO₂ torna a salire fino alle 11:45 poi viene riaperta la finestra 1 e la porta e questo comporta un nuovo decremento di CO₂ fino alle 12:55, poi l'anidride carbonica sale, arriva al picco alle 13:45 momento in cui si apre la porta per permettere l'uscita degli studenti e la CO₂ decade.

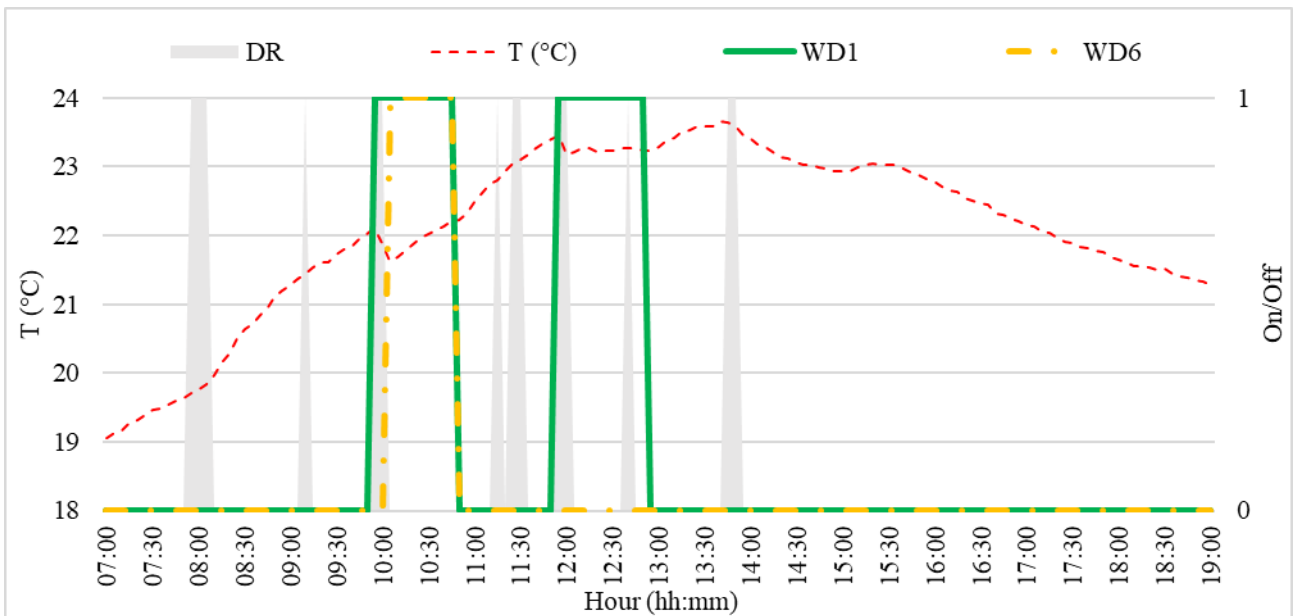


Figura 73_Andamento Temperatura del 21 marzo 2023 nell'aula 4 di Falconara in funzione dell'apertura di porta e finestre

La temperatura sale dal mattino fino alle 9:45, prima della ricreazione, poi vengono aperte finestre e porta e ciò provoca un decremento di temperatura finché la porta rimane aperta poi la temperatura torna a crescere fino alle 11:50. Con l'apertura della finestra 1 alle 11:50 fino alle 12:55 la temperatura

è costante sopra i 23°C. Quando la finestra si chiude la temperatura torna a salire e poi decresce gradualmente dopo l'uscita degli studenti dall'aula.

Dall'analisi di tutti i dati di CO₂, temperatura e apertura finestre e porta e visualizzando complessivamente i grafici di tutti i giorni, si può affermare che la fascia oraria in cui probabilmente gli alunni fanno ricreazione è tra le 9:50 e le 10:05 in quanto c'è un decadimento a picco della CO₂. Inoltre, tra le 11:50 e le 12:00 ricorre per tutti i giorni analizzati l'apertura della porta probabilmente per il cambio dell'insegnante. Le finestre che vengono aperte di più sono la 1, 3 e 6 e questo ci fa pensare che quando viene aperta una finestra non vengono aperte entrambe le ante ma solo una per come sono conformate le finestre nell'aula di Falconara.

Date	DR	WD1	WD2	WD3	WD4	WD5	WD6
15/03/2023	10%	3%	0%	25%	unknown	unknown	unknown
16/03/2023	23%	17%	0%	25%	unknown	unknown	16%
17/03/2023	12%	3%	0%	0%	unknown	unknown	0%
20/03/2023	11%	8%	0%	0%	unknown	13%	13%
21/03/2023	10%	16%	0%	0%	unknown	0%	6%

Tabella 17_ Medie percentuali di apertura porta e finestre per l'aula di Falconara considerando l'orario in cui la scuola è aperta dalle 7:00 alle 19:00

La *Tabella 17* riporta le percentuali di apertura porta e finestre dell'aula 3 a Falconara ricavate dai dati di tutto l'arco della giornata scolastica ovvero dalle 7:00 alle 19:00.

La porta risulta aperta almeno il 10% del tempo per tutti i giorni esaminati con una prevalenza di apertura il 16 marzo in cui è aperta per il 23% del tempo.

Il 15 marzo viene aperta la finestra 1 al 3% del tempo e la 3 per il 25% del tempo, il 16 marzo viene aperta la finestra 1 al 17% del tempo e la 3 al 25% e la 6 al 16% ed è questo il giorno in cui la maggior parte delle finestre sono aperte per la maggior parte del tempo. Il 17 marzo è il giorno in cui solo la finestra 1 è aperta per il 3% del tempo, il 20 marzo viene aperta la finestra 1 all'8% e la 5 e la 6 entrambe per il 13% del tempo. Il 21 infine è aperta la finestra 1 per il 16% del tempo e la 6 per il 6% del tempo. Si evidenziano valori sconosciuti dovuti probabilmente al fatto che i sensori non hanno funzionato.

Ciò che emerge dai dati della *Tabella 17* e dai grafici del presente paragrafo è che le finestre dell'aula vengono aperte per poco tempo e in quel periodo probabilmente la finestra 1 è quella che determina un maggiore e più efficiente ricambio d'aria probabilmente perché si trova in linea d'aria con la porta d'ingresso dell'aula sulla parete opposta. In oltre la finestra 1 è quella che viene aperta più di tutte.

Recanati

Di seguito verranno illustrati, come fatto per l'aula di Falconara, gli andamenti di tutti i dati ricavati dai sensori posti nell'aula 10 della scuola di Recanati, giorno per giorno, dall'8 maggio al 15 maggio 2024, escluso il sabato e la domenica. Per ogni giorno sono riportati due grafici, nel primo sono illustrati gli andamenti della CO₂ ricavata come media delle rilevazioni dalle 3 Hobo presenti nell'aula, i dati delle presenze in aula visualizzati come pallini azzurri, i dati di apertura e chiusura porta visualizzati come aree in grigio (la porta è aperta quando il grafico ha uno sfondo grigio e il sensore risulta in modalità "on" = 1 nel grafico) e l'apertura delle finestre 2 e 4 che risultano essere le uniche apribili.

Nel secondo grafico, sono riportati oltre ai dati della presenza di utenti in aula e apertura e chiusura porta e finestre, come per il primo grafico, anche la temperatura ricavata come media delle 3 temperature acquisite dalle 3 Hobo poste nell'aula.

8 maggio 2024

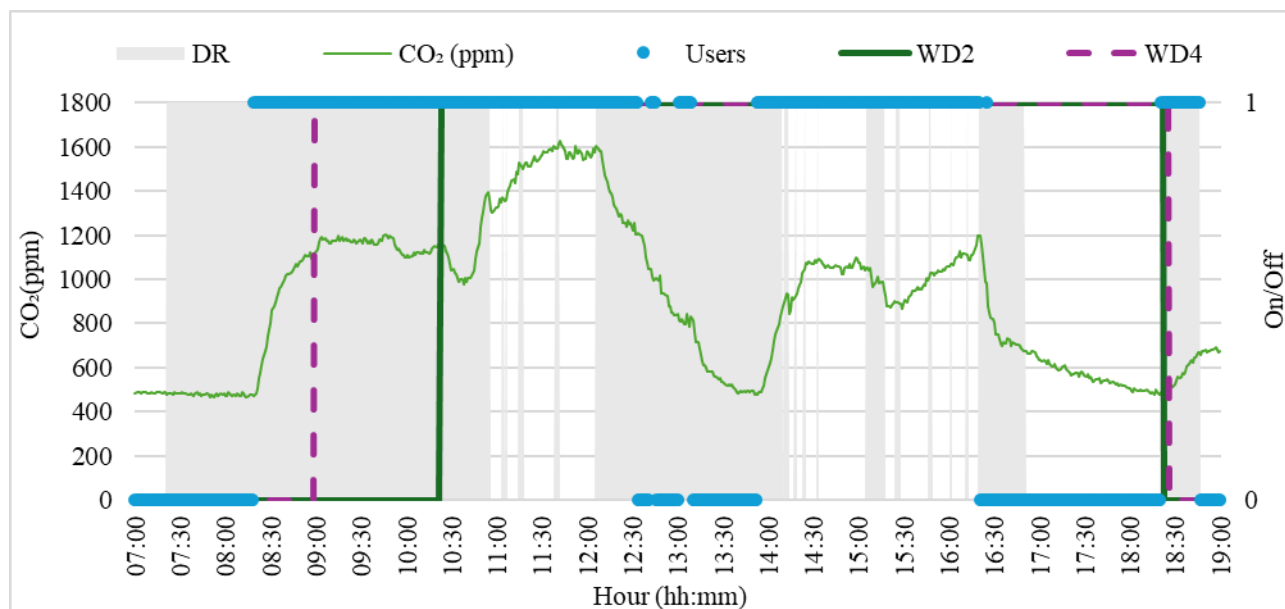


Figura 74 _Andamento CO₂ per il giorno 8 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

Per quanto riguarda il livello di CO₂, inizia a crescere dalle ore 8:20 orario in cui gli alunni entrano in classe, è stabile fino alle 10:20 circa e poi scende fino alle 10:40. Successivamente risale in modo graduale fino alle 11:40 e rimane costante fino alle 12.15 circa per poi decrescere gradualmente fino ad arrivare a valori di 500 ppm circa durante la pausa pranzo (dalle 12:20 alle 14:00). Poco prima delle 14:00 vediamo un aumento di CO₂ graduale segno che gli studenti rientrano in classe, la CO₂ rimane costante fino alle 15.10 circa momento in cui viene aperta la porta quindi probabilmente qualcuno esce dall'aula in quanto si registra un lieve decremento di anidride carbonica. La CO₂ poi risale fino alle 16.20 dove c'è un picco per poi decrescere in modo graduale perché gli studenti escono dall'aula.

L'acquisitore di presenza ci indica assenza di persone tra le 8:00 e le 8:20, alle 8:20 gli alunni entrano in classe e risultano rimanerci fino alle 12.20 circa quindi probabilmente anche durante la ricreazione,

che si stima intorno alle 10:20-10:35. Dalle 12:25 alle 13:55 circa nessuna presenza in aula a parte tra le 13:00 e le 13:10 forse perché rientra qualche alunno o perché entrano i collaboratori scolastici. Gli alunni fanno rientro in aula alle 14:00 per le lezioni pomeridiane e sono sempre presenti fino all'orario di uscita alle 16:20.

Per quanto concerne il sensore installato sulla porta, i dati ci dicono che questa è aperta sin dalle 8:00 del mattino quindi prima che gli studenti entrano in classe e rimane aperta fino a dopo la ricreazione e alle 10:55 si chiude. Tra le 10:55 e le 12:05 subisce 3 aperture ma si richiude subito dopo probabilmente per l'uscita di qualche studente e alle 12:05 si apre e rimane aperta per tutto l'orario del pranzo e si chiude solo dopo che gli studenti fanno rientro in classe alle 14:10 circa. Nel pomeriggio la porta si apre tra le 15:05 e le 15:15 probabilmente perché c'è un cambio d'ora e dunque entra un nuovo insegnante. La porta si riapre poi alle 16:20 per l'uscita degli studenti.

Osservando l'andamento dei dati relativi all'apertura e chiusura delle due finestre apribili, la finestra 4 viene aperta alle 9:00 e si chiude alle 18:20 circa mentre la finestra 2 si apre alle 10.20 e anche questa viene chiusa alle 18:20 circa, la chiusura della finestra a quest'ora è giustificata anche dal fatto che nell'istante in cui le due finestre vengono chiuse, viene aperta la porta e qualcuno è entrato nell'aula perché il sensore della presenza individua gli utenti.

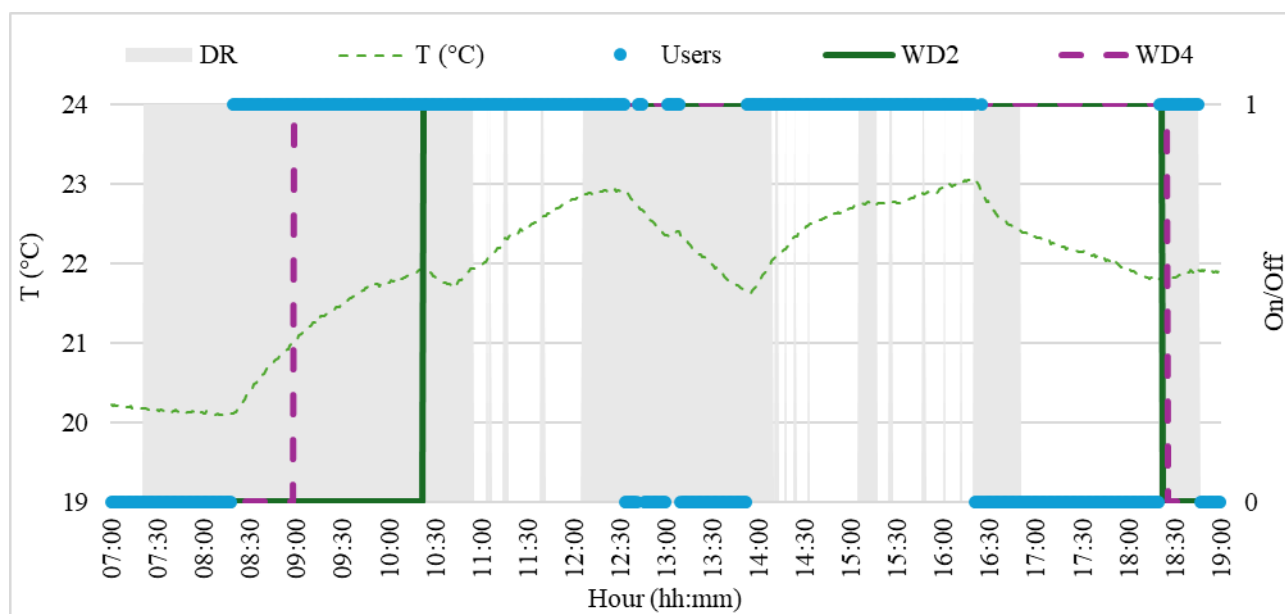


Figura 75 _Andamento Temperatura per il giorno 8 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

La temperatura, come si può notare fino alle 8:20 è di poco superiore a 20 °C, quando gli studenti entrano in classe sale gradualmente fino alle 10.20. A quest'ora viene aperta la finestra 2 e anche la porta è aperta. Questo ha provocato un abbassamento lieve di temperatura unito al fatto che in questo periodo dovrebbe esserci la ricreazione per gli studenti come mostrato nel grafico in figura, non appena la porta viene chiusa la temperatura torna a salire per poi decrescere gradualmente dopo le 12.20 quando gli studenti escono. Anche nel pomeriggio dalle 14:00 alle 16:20 la temperatura ha un andamento crescente ma si nota che, quando la porta dell'aula viene aperta e anche le finestre sono aperte la temperatura rimane costante.

9 maggio 2024

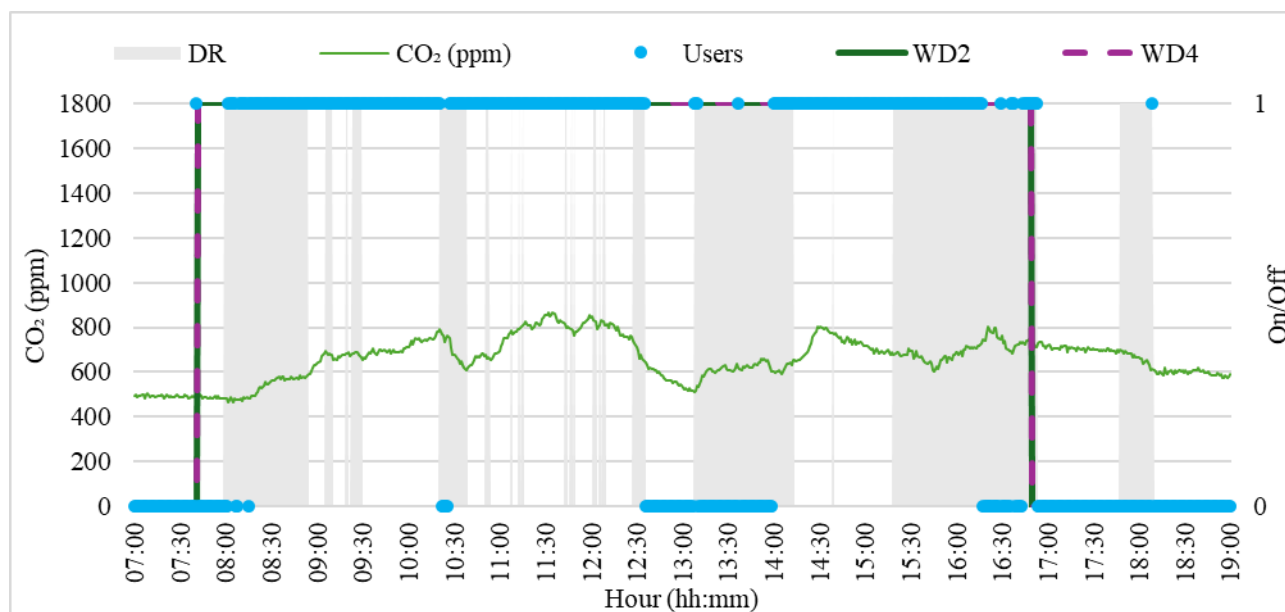


Figura 76_Andamento CO₂ del giorno 9 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

Per quanto riguarda l'andamento della CO₂, prima dell'ingresso degli alunni in classe il livello è costante, tra le 8:20 e le 10:20 l'andamento dell'anidride carbonica non è costante nella sua crescita, infatti, in corrispondenza delle aperture della porta dell'aula, la CO₂ scende donando così al grafico un andamento "frastagliato". Il picco massimo di CO₂ nelle prime due ore si ha alle 10:20, poi si evidenzia un decadimento di CO₂ fino alle 10:40 circa dovuto al fatto che gli studenti escono per la ricreazione e la porta viene aperta. Dopo la ricreazione, gli studenti rientrano in classe e gradualmente la CO₂ risale ma il suo andamento continua a manifestare picchi e decadimenti fino alle 12:20. Dopo le 12.20 gli studenti escono e il decadimento dell'anidride carbonica è costante e progressivo fino alle 13:00. Dalle 13:00 alle 14:00 la CO₂ è costante a circa 600 ppm segno del fatto che qualcuno è entrato in classe. La CO₂ poi sale gradualmente fino alle 14:20 dopo il rientro in aula degli alunni. Tra le 14:20 e le 16:20 la CO₂ oscilla con valori tra gli 800 e i 600 ppm e dopo l'uscita degli studenti alle 16:20 l'anidride carbonica decresce molto lentamente.

L'acquisitore di presenze che registra gli utenti in aula ci indica che qualcuno entra in aula intorno alle 7:40 e vengono aperte entrambe le finestre. Gli alunni entrano in classe alle 8:20 e rimangono in aula fino alle 10:20 poi escono per la ricreazione tra le 10:20 e le 10:35 circa. Dopo la ricreazione gli alunni rientrano in aula e rimangono lì fino alle 12:20 circa orario in cui escono infatti tra le 12:20 e le 14:00 c'è assenza di utenti eccetto alle 13:00 e alle 13:35 perché probabilmente entra qualcuno nell'aula durante la pausa pranzo, forse i collaboratori scolastici, in questo modo, è anche possibile giustificare il lieve aumento di anidride carbonica che era stato evidenziato in questa fascia oraria in precedenza. Tra le 14:00 e le 16:20 gli alunni sono sempre presenti in aula, tra le 16.20 e le 16.50 qualcuno rientra in aula perché l'indicatore di presenza risulta attivo, quando gli utenti escono il grafico illustra che anche le due finestre vengono chiuse.

La porta è aperta sin dalle 8:00 del mattino, si chiude alle 8.50 circa e fino alle 10:20 subisce 2 aperture forse per l'ingresso/uscita di alcuni studenti. Alle 10:20 la porta si apre per la ricreazione e si richiude alle 10:35 circa. Successivamente la porta è sempre chiusa a parte qualche apertura per consentire

l'ingresso e uscita di qualche studente e la porta si apre per l'uscita degli studenti per il pranzo. La porta si riapre alle 13:00 circa segno che qualcuno entra nell'aula e rimane aperta fino alle 14:15 circa per consentire agli studenti di rientrare per le lezioni del pomeriggio. Fino alle 15:20 la porta è sempre chiusa e poi si riapre fino alle 16:50. Tra le 17:45 e le 18:10 la porta è aperta.

Le due finestre che si aprono ovvero la 2 e la 4, risultano sempre aperte per tutto l'arco della giornata dalle 7:40 del mattino fino alle 16:50.

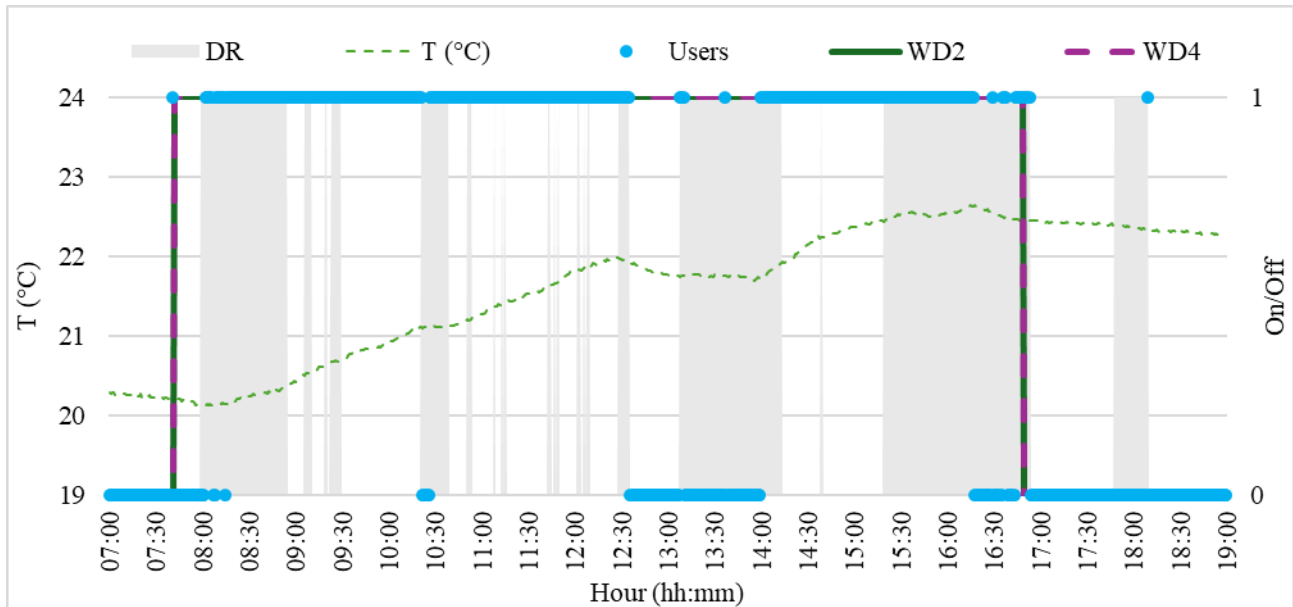


Figura 77 _Andamento Temperatura del giorno 9 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

Dal grafico della temperatura in funzione dei dati dei vari sensori, si può notare che fino alle 8:00 la temperatura si mantiene costante poi cresce in modo graduale fino al momento della ricreazione intorno alle 10:20 e viene aperta la porta, gli studenti escono e la temperatura subisce un arresto nella crescita rimanendo quindi costante sopra i 21°C. Dopo la ricreazione la temperatura continua a crescere arrivando a 22 °C alle 12:20 ovvero alla fine delle lezioni del mattino, poi scende sotto i 22°C quando gli studenti escono per la pausa pranzo. Al rientro degli studenti in aula alle 14:00 la temperatura sale e il suo incremento si arresta per rimanere costante dalle 15:20 fino alle 16:20 quando gli studenti escono dall'aula. La costanza della temperatura dalle 15:20 è probabilmente dovuta al fatto che viene aperta la porta per tutta la durata della seconda ora di lezione del pomeriggio.

10 maggio 2024

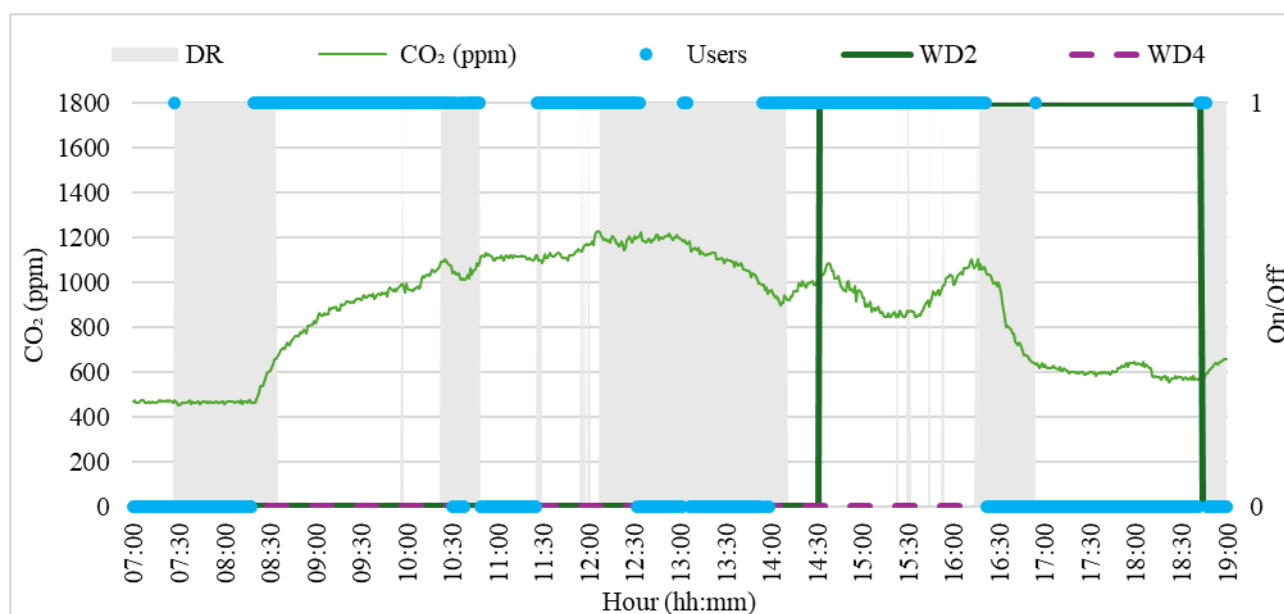


Figura 78 _Andamento CO₂ del 10 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

Per quanto riguarda l'andamento della CO₂, si registra un aumento graduale dalle 8:20 alle 10:20, poi un lieve calo di anidride carbonica durante il momento della ricreazione dovuto al fatto che gli studenti escono e la porta viene aperta. In seguito, dopo le 10:40 si registra un livello costante di CO₂ fino alle 13.00 circa poi decresce gradualmente fino alle 14:00 in cui tocca i livelli più bassi di CO₂ intorno a 900 ppm. Nonostante gli studenti escono per il pranzo l'anidride carbonica rimane alta probabilmente perché le finestre al mattino sono chiuse e l'abbassamento di CO₂ è dovuto solo all'apertura della porta e all'uscita degli studenti. Tra le 14:00 e le 14:40 l'anidride carbonica sale in modo graduale poi decade perché viene aperta la finestra 2 fino alle 15:20. Probabilmente alle 15:20 avviene un cambio d'ora l'insegnante esce e rientra l'insegnante successivo, l'anidride carbonica risale fino alle 16:20 ed infine decresce dopo che gli studenti vanno via arrivando a valori di 600 ppm. Si può notare come in questo giorno il livello di anidride carbonica in generale è sempre molto alto anche quando gli studenti non sono in classe durante la pausa pranzo, questo è probabilmente imputabile al fatto che durante la mattina non vengono mai aperte le finestre e quando viene aperta dopo le 14:30 la CO₂ scende.

Il sensore delle presenze registra presenza di utenti la mattina dalle 8:20 alle 10:20, durante la ricreazione gli studenti escono e l'ora successiva nessuno è presente in classe probabilmente perché gli studenti cambiano aula per qualche laboratorio. Alle 11:20 gli studenti rientrano in classe fino all'orario di uscita alle 12:20. Intorno alle 13:00 qualcuno entra nell'aula per poi uscire subito dopo. Successivamente le presenze ricominciano dalle 14:00 fino alle 16:20. Nel momento in cui la finestra 2 viene chiusa alle 18:45 circa qualcuno entra in classe.

La porta dell'aula viene aperta alle 7:20 e rimane aperta per permettere l'ingresso degli studenti fino alle 8:35 circa, poi viene chiusa fino alla ricreazione che avviene alle 10:20 poi si apre fino alle 10:45. Alle 11:20 circa si riapre perché gli studenti tornano in classe e rimane chiusa fino alle 12:10, poi si apre e rimarrà aperta fino alle 14:10 per il rientro degli studenti nel pomeriggio, si chiude nel momento

delle lezioni e tra le 16:20 e le 16:50 si riapre per l'uscita degli alunni. La porta viene poi aperta alle 18:45 quando un utente entra in aula per chiudere la finestra.

La finestra 4 risulta sempre chiusa nell'arco della giornata mentre la finestra 2 si apre alle ore 14:30 dopo l'ingresso degli alunni in aula per le lezioni del pomeriggio e viene chiusa alle 18:45 circa momento in cui qualcuno entra in aula perché il sensore della porta registra l'apertura e l'acquisitore di presenze individua la presenza di utenti.

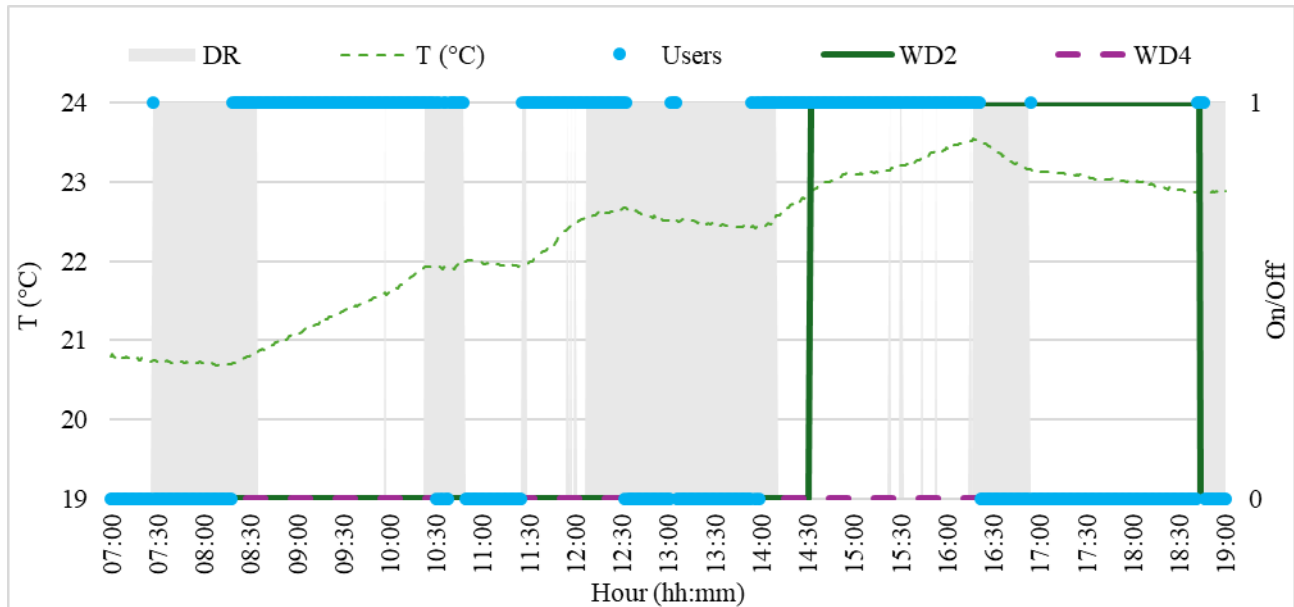


Figura 79 _Andamento Temperatura del 10 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

La temperatura, come si evince dal grafico sopra, si mantiene sotto i 21°C prima dell'arrivo degli studenti in classe alle 8:20 del mattino, poi sale in modo costante fino alle 10:20 quando c'è la ricreazione e rimane costante poco sotto i 22 °C fino alle 11:30 perché gli studenti escono dall'aula. Solo quando vi fanno rientro la temperatura ricomincia a salire fino a 22,5°C e si mantiene costante fino alle 14:00. Durante la mattinata si nota che la temperatura in due momenti rimane costante solo perché gli studenti escono ma non scende mai perché le finestre non vengono mai aperte. Nel pomeriggio dopo l'ingresso degli alunni in aula la temperatura subisce un graduale incremento con un picco alle 16:20 a 23,5°C prima che gli studenti escono dall'aula.

13 maggio 2024

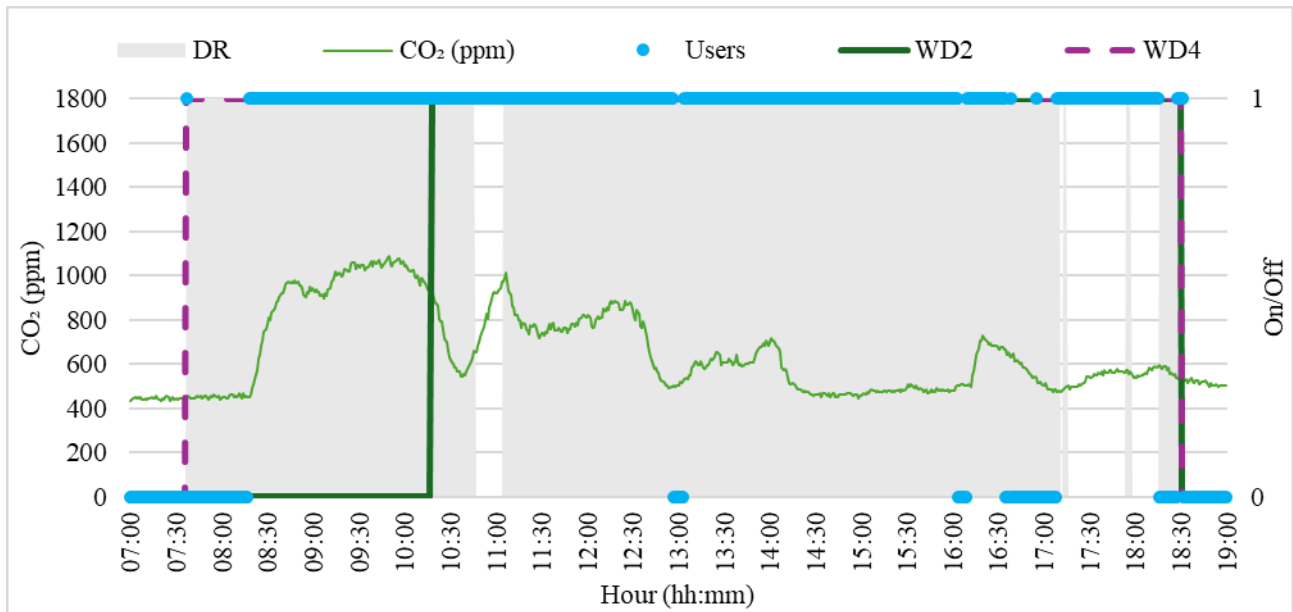


Figura 80 _Andamento CO₂ del 13 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

La CO₂ cresce tra le 8:20 e le 8:40, si mantiene poi costante a circa 1000 ppm poi ha un decadimento durante la ricreazione, dopo le 10:35 riprende gradualmente ad aumentare con un picco intorno alle 11:00 e poi rimane costante fino alle 12:20 circa. Durante la pausa pranzo l'anidride carbonica tra le 13:10 e le 14:00 assume valori intorno ai 600 pp e poi decade intorno i 400 ppm quando in teoria gli studenti dovrebbero essere in classe. Si ipotizza che nel pomeriggio non si tengono lezioni anche se si nota un picco di CO₂ intorno alle 16:20-16:40.

Il sensore delle presenze probabilmente in questo giorno non restituisce dati utilizzabili in quanto risulta esserci presenza di persone sempre dalle 8:20 alle 12:50 circa e dalle 13:05 alle 16:00 circa. Questo non combacia con i livelli di anidride carbonica molto bassi che si registrano tra le 14:20 e le 16:00. La porta risulta sempre aperta dalle 8:00 alle 17:00 eccetto in un intervallo tra le 10:45 e le 11:00 in cui è chiusa.

La finestra 4 è aperta già dalle 7:35 e si chiude alle 18:30 mentre la 2 si apre alle 10:20 circa e si chiude anch'essa alle 18:30.

Questo giorno, dati i valori di anidride carbonica e di presenza non rispondenti con la realtà, viene preso in considerazione solo per il decadimento di CO₂ alle 10.20 durante la ricreazione e che è dovuto molto probabilmente all'apertura della finestra 2.

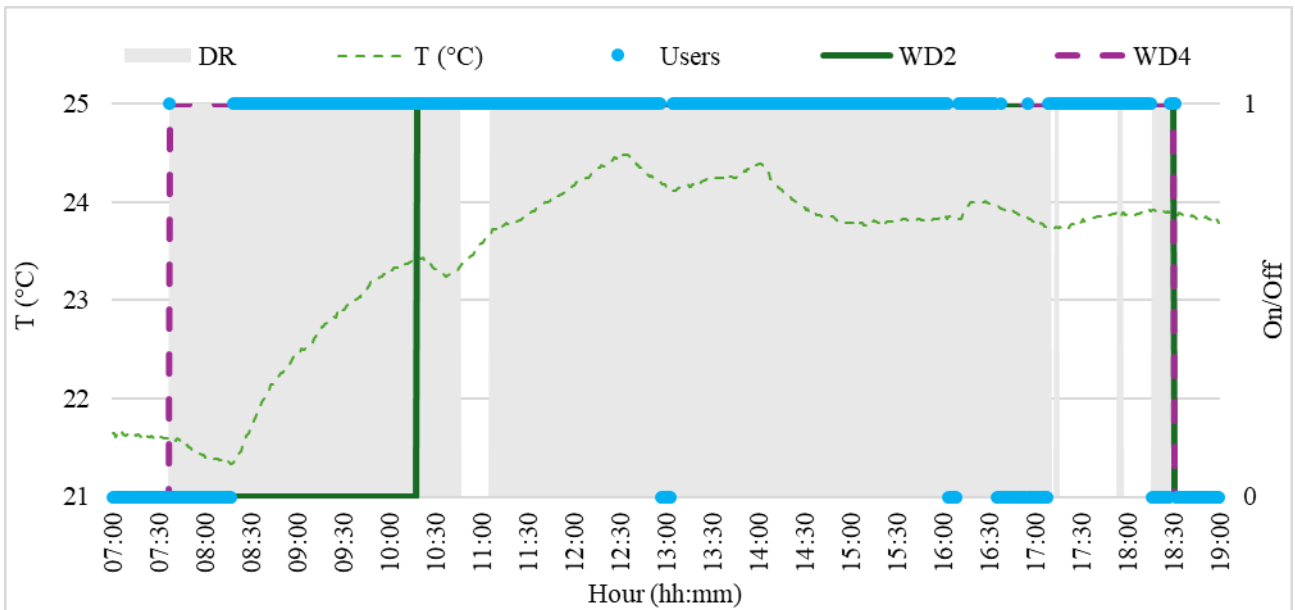


Figura 81 _Andamento Temperatura del 13 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

La temperatura, come si nota dal grafico sopra, ha un valore di 21,6°C circa prima dell'arrivo degli studenti al mattino, quando viene aperta la finestra alle 7:35 la temperatura scende fino a 21,3°C, poi quando gli studenti entrano in classe inizia a crescere e supera i 23°C alle 10:20. Durante la ricreazione la temperatura scende probabilmente perché viene aperta la finestra 2. In seguito, la temperatura cresce fino alle 12:20 in cui raggiunge i 24,5°C, e poi scende perché qualcuno esce dall'aula. Dalle 14:00 in poi la temperatura si mantiene costante a circa 23,8°C.

14 maggio 2024

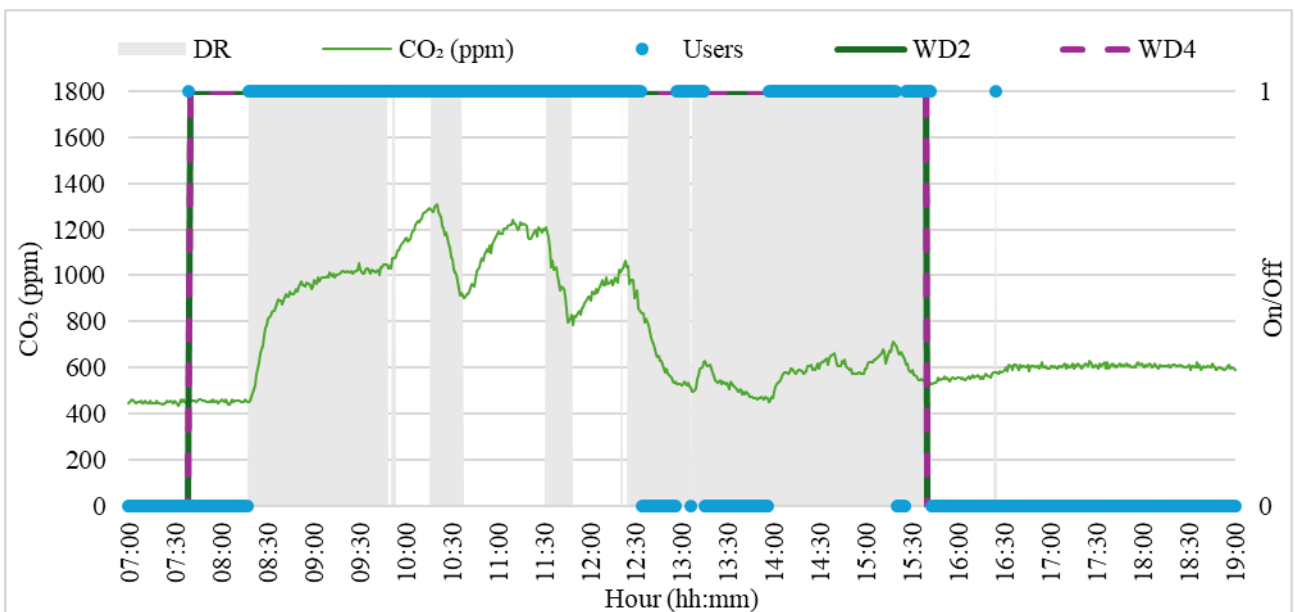


Figura 82 _Andamento CO₂ del 14 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

Il livello di anidride carbonica registrato inizia ad aumentare dalle 8:20 fino alle 8:40, poi rimane circa costante a 1000 ppm e tra le 9:30 e le 9:45, successivamente subisce un'impennata fino alle 10:20 molto probabilmente perché viene chiusa la porta. È evidente un decadimento repentino per via della ricreazione e dopo le 10:40 riprende a crescere fino alle 11:30. Tra le 11:30 e le 11:40 la CO₂ decade perché viene aperta la porta e poi riaumenta fino alle 12:20, momento della pausa pranzo in cui gli studenti escono dall'aula e si ha un graduale decadimento della CO₂ fino a livelli di poco superiori i 400 ppm. Alle 14:00 la CO₂ ricomincia ad aumentare per le lezioni pomeridiane e si mantiene costante a livelli di 650 ppm circa fino alle 15:20, momento in cui probabilmente gli studenti escono infatti la CO₂ subisce un arresto nella sua crescita.

L'acquisitore di presenze ci indica che gli studenti dalle 8:20 alle 12:20 sono sempre in classe, tra le 12:30 e le 14:00 gli studenti escono per la pausa pranzo ma viene registrata presenza di persone tra le 13:00 e le 13:10 forse perché qualcuno entra a sistemare l'aula. L'acquisitore di presenza identifica presenza di utenti tra le 14:00 e le 15:40 quindi probabilmente gli studenti escono intorno alle 15:20 ma dopo la loro uscita, nell'aula entrano gli operatori scolastici per le pulizie o qualche insegnante.

Il sensore della porta ci indica che la porta si apre alle 8:20 quando gli studenti entrano in classe e rimane aperta fino alle 9:30, poi si chiude e si riapre alle 10:20 quando c'è la ricreazione e rimane aperta fino alle 10:35 momento in cui rientra l'insegnante che la richiude e rimane chiusa fino alle 11:30 circa al momento del cambio d'ora poi si richiude e alle 12:20 si apre quando gli studenti escono. Successivamente la porta rimane sempre aperta fino alle 15:40.

Entrambe le finestre risultano aperte sin dalle 7:35 del mattino ed entrambe vengono chiuse alle 15:40. Questo conferma il fatto che gli studenti nel pomeriggio frequentano dalle 14:00 alle 15:20 si è visto che le finestre vengono chiuse subito dopo la loro uscita dalla classe. Probabilmente l'operatore scolastico entra in classe dopo che gli studenti sono usciti e chiude le finestre e nello stesso momento viene chiusa anche la porta.

Da questo grafico si può notare che l'andamento della CO₂ al mattino dipende solo dall'apertura della porta perché le finestre sono sempre aperte e gli studenti sono sempre in classe e quando la porta si apre la CO₂ decade. Nel pomeriggio invece dopo che gli studenti escono per la pausa pranzo, la porta è sempre aperta anche quando ricominciano le lezioni e nonostante gli studenti siano in classe questo fa sì che il livello di anidride carbonica risulti basso.

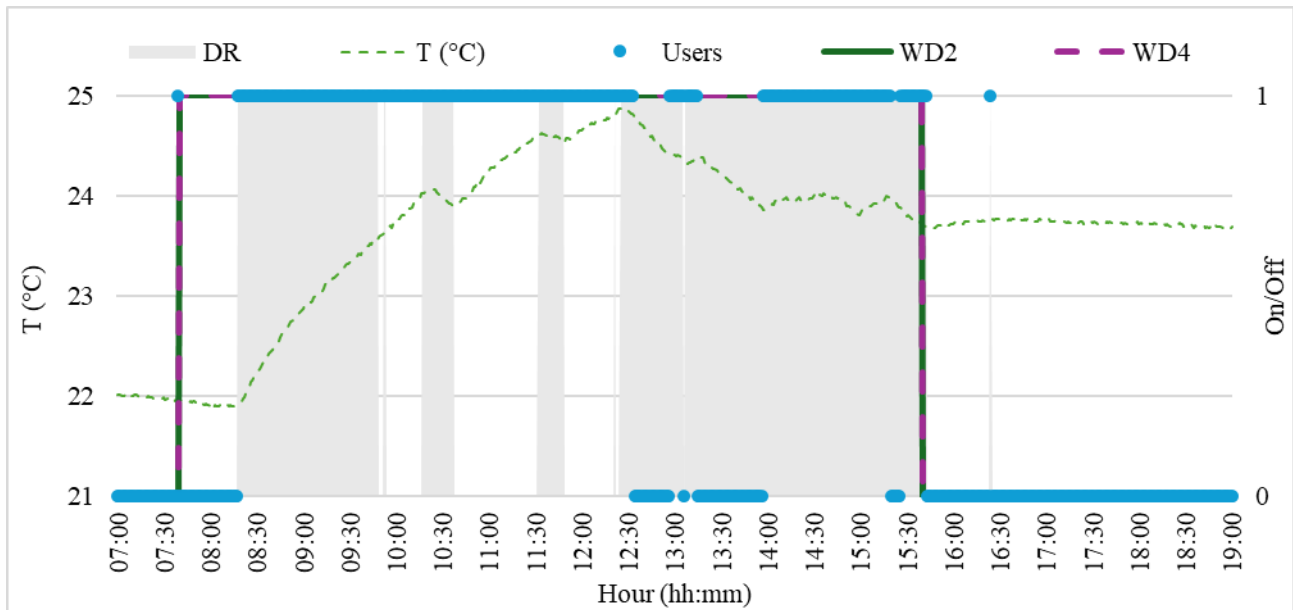


Figura 83_Andamento Temperatura del 14 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

La temperatura risulta costante prima dell'arrivo degli studenti a 22°C circa, dopo l'ingresso degli studenti dentro l'aula la temperatura sale arrivando a 24°C prima della ricreazione. Durante la ricreazione la temperatura scende probabilmente perché viene aperta la porta, poi risale arrivando oltre i 24,5°C, la sua crescita si arresta quando viene aperta la porta alle 11:30 e poi sale fino alle 12:20. Quando gli studenti escono dall'aula la temperatura inizia a decrescere e tocca il valore più basso alle 14:00. Nel pomeriggio nonostante gli studenti rientrano in classe la temperatura non sale di molto ma si mantiene sui 24°C ed inizia a decrescere alle 15:20 quando gli studenti escono dall'aula. L'abbassamento di temperatura dopo l'uscita degli studenti è dovuto oltre all'assenza di studenti anche al fatto che la porta rimane sempre aperta.

15 maggio 2024

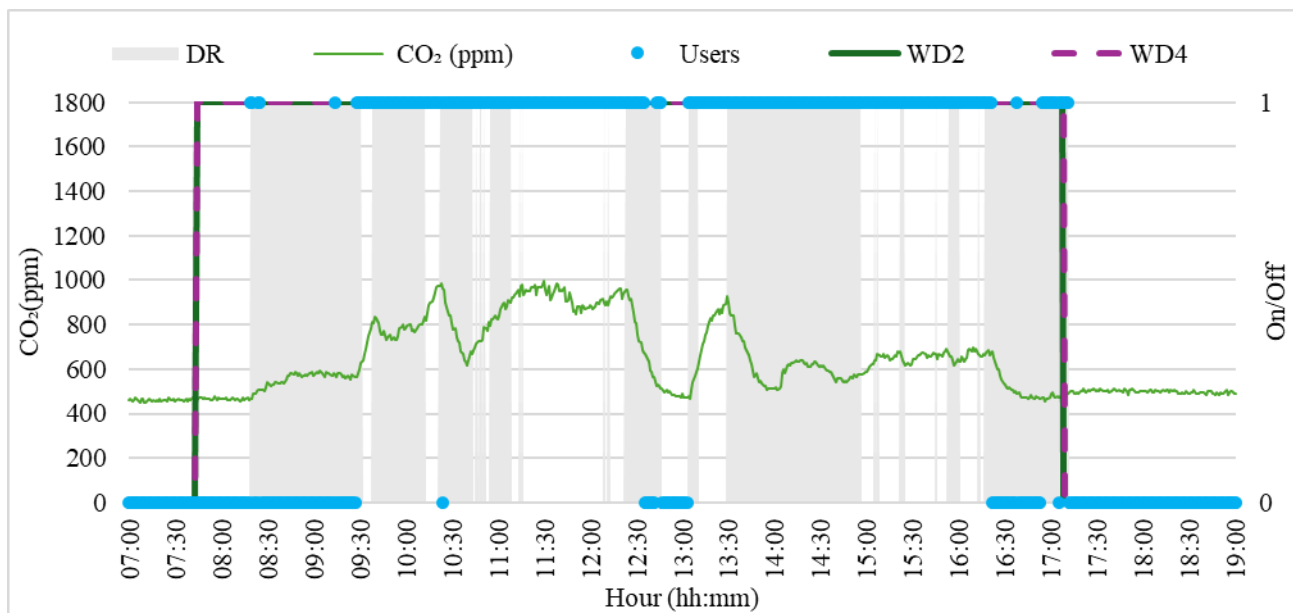


Figura 84 _Andamento CO₂ del 15 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

Il livello di CO₂ è basso fino alle 9:20, probabilmente gli studenti saltano la prima ora, infatti, dopo le 9:20 l'anidride carbonica sale fino alle 10:20 ovvero il momento della ricreazione in cui c'è un decadimento, poi risale fino alle 11:20 e si mantiene costante fino alle 12:20 circa momento in cui gli studenti escono per il pranzo. Alle 13:00 la CO₂ subisce di nuovo un aumento fino alle 13:30 e sfiora i 1000 ppm, poi scende a 500 ppm e alle 14:00 risale per mantenersi costante intorno ai 700 ppm fino alle 16:20 quando gli studenti escono e l'anidride carbonica crolla a 500 ppm.

Il sensore delle presenze indica che c'è assenza di studenti fino alle 9:20, ma c'è la presenza di qualcuno alle 8:20 probabilmente gli alunni entrano nell'aula ma poi si spostano in un'altra aula, il sensore poi acquisisce presenze tra le 9:20 e le 12:30 circa eccetto alle 10:20 quando gli studenti escono per la ricreazione. Tra le 12:30 e le 13:00 nessuno è in aula ma dalle 13:00 fino alle 16:20 c'è presenza continua di studenti in aula. Dati i valori di anidride carbonica e del rilevatore di presenza in aula. Si ipotizza che gli studenti recuperano la prima ora di lezione al pomeriggio.

La porta risulta essere prevalentemente aperta fino alle 11:10, poi viene chiusa e si riapre alle 12:20. Tra le 13:30 e le 15:00 rimane aperta e poi viene chiusa per poi riaprirsi alle 16:20 per l'uscita degli studenti. In generale si nota che ad ogni apertura della porta quando gli studenti rimangono in classe c'è un decremento della CO₂.

Le finestre sono aperte sin dalle 7:40 ed entrambe vengono chiuse alle 17:10 circa, l'indicatore di presenza registra in quel momento l'ingresso di qualcuno nell'aula e dopo la chiusura delle finestre viene chiusa anche la porta.

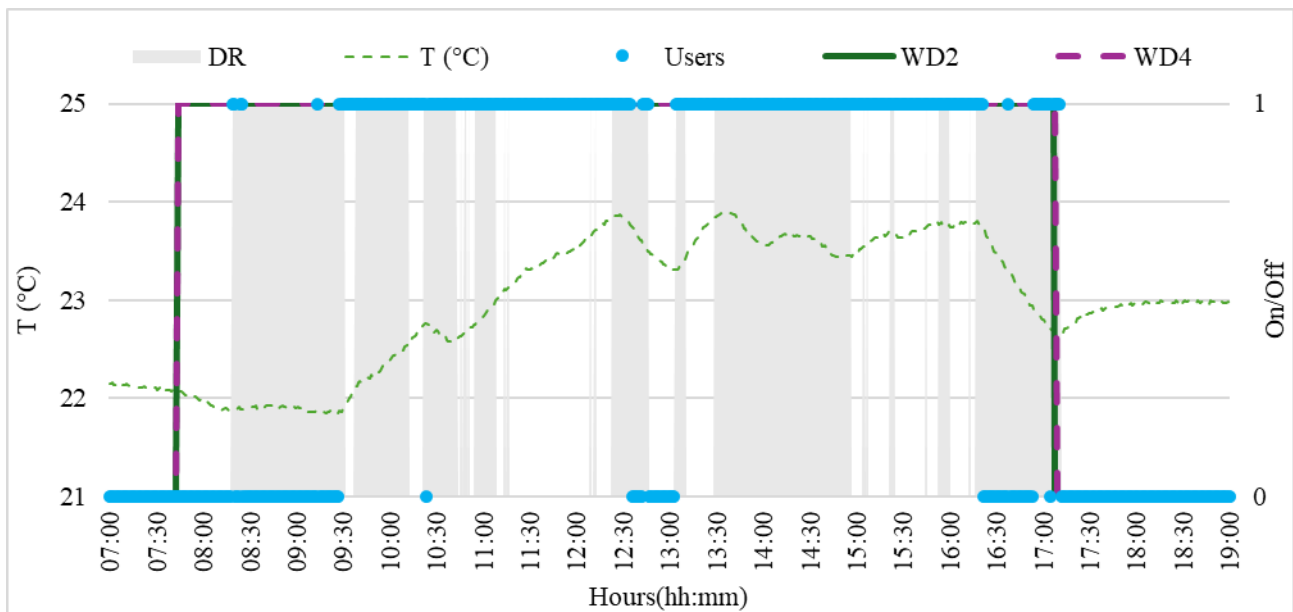


Figura 85 _Andamento Temperatura del 15 maggio 2024 nell'aula 10 di Recanati in funzione dell'apertura di porta e finestre e individuazione presenza di utenti

La temperatura è sopra i 22°C dalle 7:00 alle 7:40 momento in cui entrambe le finestre vengono aperte, la temperatura scende a causa di ciò e si mantiene costante a 21,8°C fino alle 9:30 ovvero quando gli studenti entrano in classe. Infatti, dalle 9:30 la temperatura inizia a salire fino alla ricreazione alle 10:20. Gli studenti escono, la porta si apre e la temperatura si abbassa, poi riprende ad aumentare fino alle 12:20 all'uscita degli studenti. Dalle 12:20 viene aperta la porta e la temperatura decresce fino alle 13:00. Dalle 13:00 in poi viene rilevata presenza di studenti nell'aula e la temperatura si rialza e si mantiene intorno ai 23,5°C fino all'uscita degli studenti alle 16:20. Dopo l'uscita degli studenti la temperatura crolla sotto i 23°C.

Analizzando tutti i grafici sia per quanto concerne la CO₂ che per la temperatura dell'aria e valutando le aperture di finestre e porta sembrerebbe esserci come ricorrenza per tutti i giorni esaminati la ricreazione intorno alle ore 10.20 infatti in ogni grafico si nota il decrescere del livello di anidride carbonica più o meno accentuato a seconda del fatto che gli studenti escono o meno dall'aula. È possibile affermare ciò sia grazie al sensore di apertura porta che ogni giorno alle 10:20 si apre sia perché il sensore conta persone rileva l'uscita degli studenti in quell'intervallo.

Data	Users	WD1	WD2	WD3	DR	WD4
08/05/2024	61%	0%	67%	0%	60%	79%
09/05/2024	59%	0%	76%	0%	41%	76%
10/05/2024	51%	35%	35%	0%	40%	0%
13/05/2024	77%	0%	68%	0%	80%	91%
14/05/2024	52%	0%	67%	0%	46%	67%
15/05/2024	57%	0%	78%	0%	47%	78%

Tabella 18 _Medie percentuali di apertura porta, finestre e presenza di studenti per l'aula di Recanati considerando l'orario in cui la scuola è aperta dalle 7:00 alle 19:00

Nella tabella soprastante per ogni giorno analizzato nella scuola di Recanati sono riportate le percentuali di presenza studenti e apertura porta e finestre per un periodo scolastico che va dalle 7:00

del mattino alle 19:00 della sera. Si può notare che, per tutti i giorni, gli studenti sono presenti in aula per più della metà del tempo (> 50%) con un picco di presenze il 13 maggio (77%) e una minoranza di presenza in classe il 10 maggio (51%).

Per quanto riguarda la porta (DR), per tutti i giorni indagati risulta aperta oltre il 40% del tempo con dei valori molto elevati l'8 maggio in cui è stata aperta il 60% del tempo e il 13 maggio giorno in cui è stata aperta l'80% del tempo.

Le finestre invece come detto in precedenza sono apribili solo 2 su 4 e le due che rimangono sempre chiuse sono la 1 e la 3 nonostante per la finestra 1 (WD1) risulti un'apertura del 35% il 10 maggio, questo dato è dovuto sicuramente ad un malfunzionamento del sensore. Eccetto per il giorno 10 maggio, in cui la finestra 2 WD2 è aperta per il 35% del tempo e la 4 è sempre chiusa, le finestre 2 e 4 (WD2 e WD4), risultano sempre aperte per più del 67 % del tempo.

4.3.3 Analisi microclimatica

Di seguito verranno illustrate per le due aule delle due scuole di Falconara e Recanati le rielaborazioni di dati microclimatici e del comfort visualizzati sottoforma di mappe termiche.

Falconara

Sono stati individuati nella scuola di Falconara 13 punti di presa, di questi 9 punti sono stati acquisiti nel mese di maggio e gli ultimi 4 nel mese di luglio. Per questo motivo i dati relativi alle temperature, il draught rate, PMV e PPD sono riferiti ai primi 9 punti; mentre la velocità dell'aria è relativa a tutti e 13 i punti perché non dipende dalla temperatura rilevata in mesi diversi dell'anno ma solo dall'impianto di ventilazione che, durante le acquisizioni dei dati, è sempre stato acceso con una velocità 2.

Di seguito è riportata una planimetria dell'aula di Falconara con individuazione dei punti di presa nei quali la Dantec ha acquisito dati alle 3 altezze di 10 cm (caviglie), 60 cm (bacino) e 110 cm (testa) e le sezioni che sono state ricavate. (Figura 86)

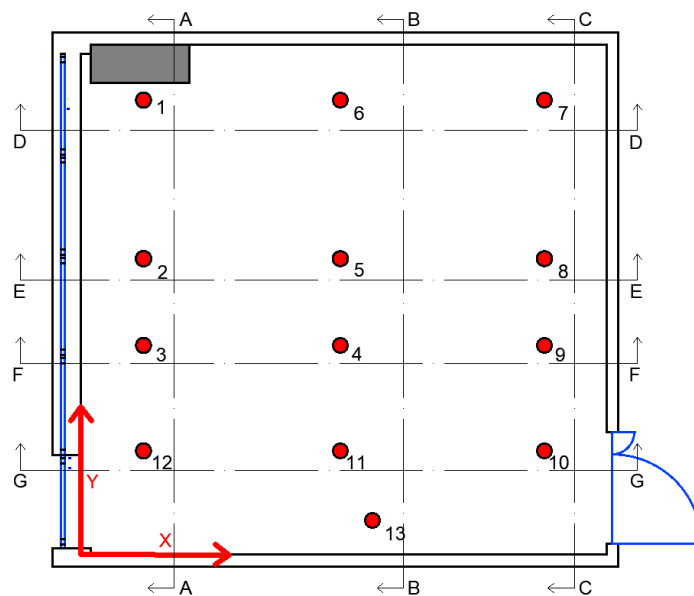


Figura 86. Planimetria aula Falconara con individuazione di tutti i punti di presa e sezioni

Temperatura dell'aria

Il primo dato analizzato è stata la temperatura dell'aria all'interno dell'aula, sono stati considerati solo i primi 9 punti di presa acquisiti nel mese di maggio 2023. Ricordando che la temperatura è acquisita alle 3 altezze di presa per ogni postazione della Dantec, inserendo i dati nel software Tecplot è stata ottenuta un'illustrazione tridimensionale dell'andamento della temperatura dell'aria nell'aula. Dal 3D è stato possibile estrapolare delle sezioni lungo l'asse X, Y e Z che mostrano l'andamento della temperatura dell'aria in una planimetria e sezione 2D che verranno illustrate nel seguito.

Dal 3D (Figura 87) è possibile notare che la zona antistante l'impianto di ventilazione è la zona più calda con valore massimo a 22,6°C a 110 cm, quindi la zona più alta. Questo è probabilmente dovuto alla vicinanza della finestra lungo quel lato. Negli altri 3 spigoli dell'aula la temperatura è invece più bassa con valori minimi a 10 cm intorno a 21,8°C. Nella zona centrale dell'aula invece la temperatura dell'aria risulta essere circa costante intorno ai 22,2°C.

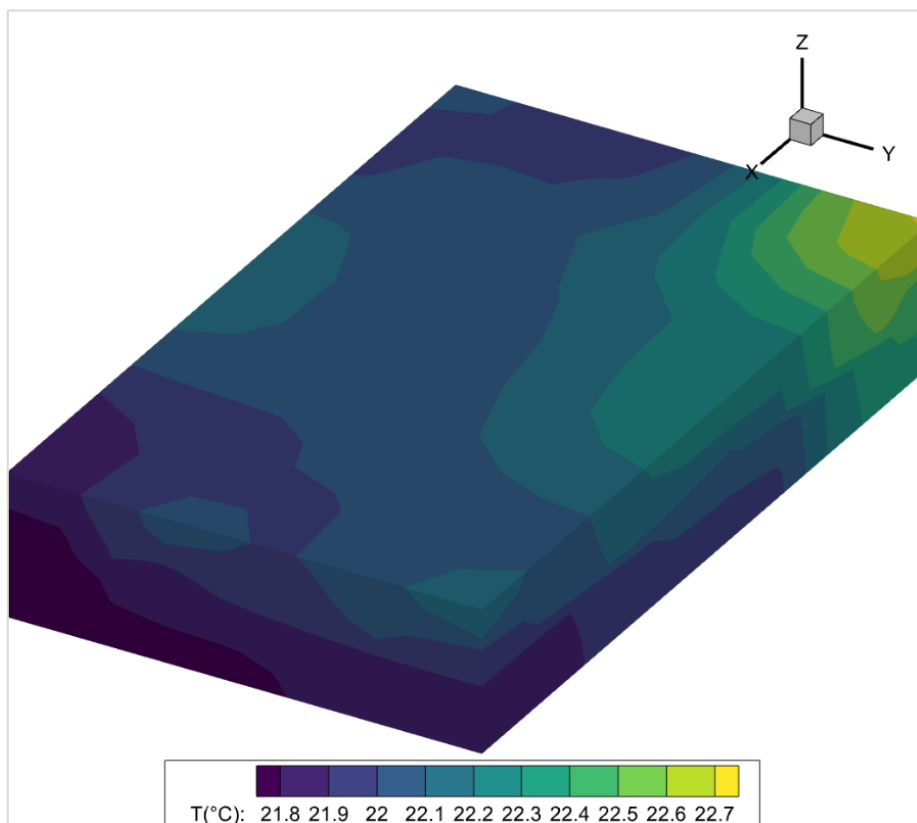


Figura 87. 3D Temperatura per i primi 9 punti di presa

-Planimetrie

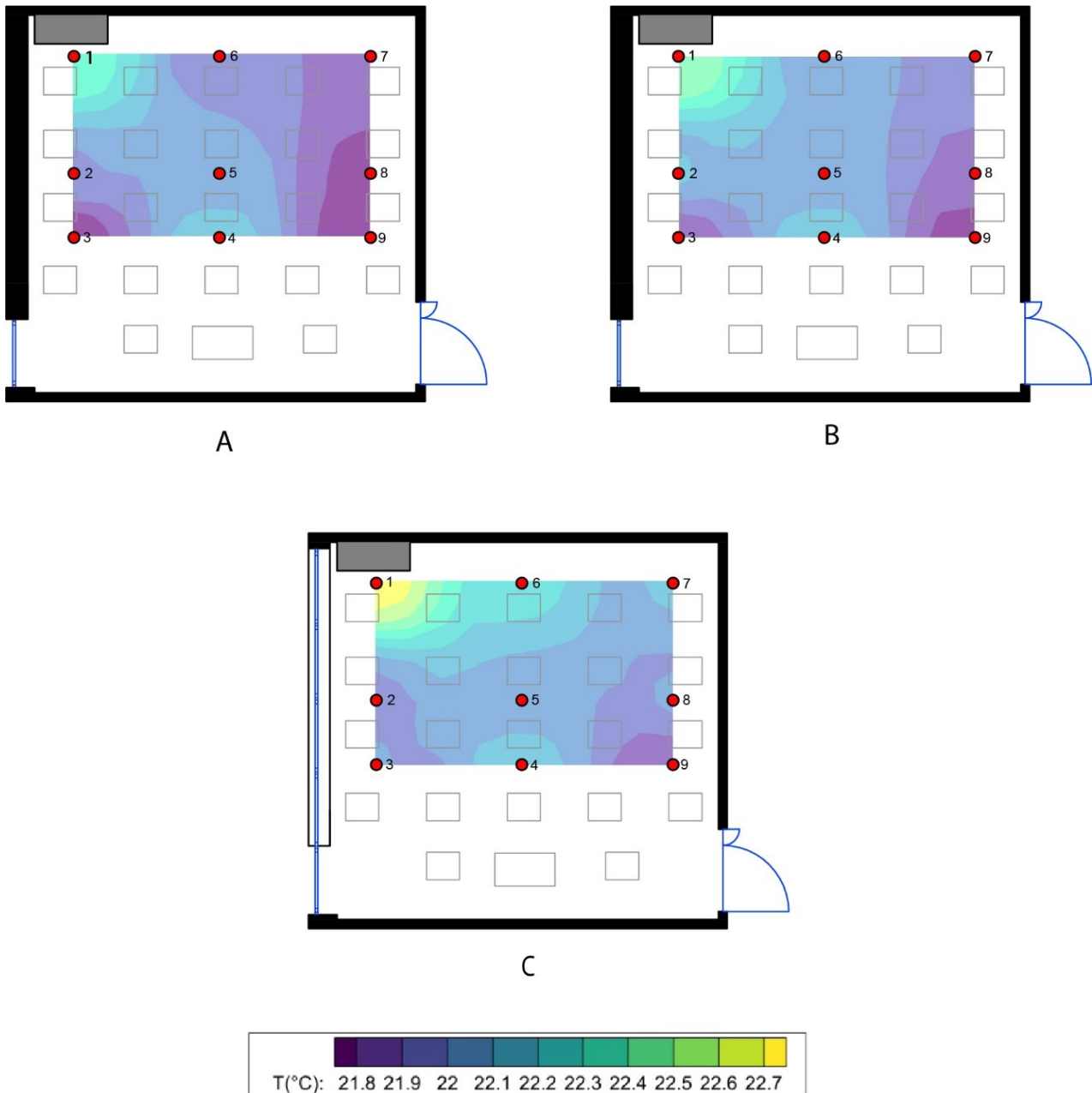


Figura 88. A planimetria a 0,10 m; B planimetria a 0,60 m; C planimetria a 1,1m

La Figura 88 mostra 3 planimetrie, la prima (A) a 10 cm da terra mostra le temperature più alte nel punto davanti all'impianto di ventilazione e al centro dell'aula. Le zone più fredde a 10 cm sembrano essere il punto 3 e tutto il lato vicino alla porta d'ingresso dell'aula dove si registrano temperature di 21,8°C. La planimetria B a 60 cm mostra che nel punto 1 la temperatura è aumentata rispetto a quella registrata a 10 cm, inoltre, anche il punto 2 sembra registrare una temperatura più alta rispetto a quella a 10 cm così come i punti 6, 7 e 8. Sembrerebbe che a 60 cm la temperatura sia aumentata e dalla zona vicino alle finestre stia aumentando verso la parte centrale dell'aula. La planimetria C a 110 cm mostra una temperatura dell'aria a 22,7°C nel punto 1 davanti all'impianto e la temperatura è aumentata anche ai punti 6 e 7 rispetto a quella registrata a 60 cm.

-Sezioni parallele all'asse y

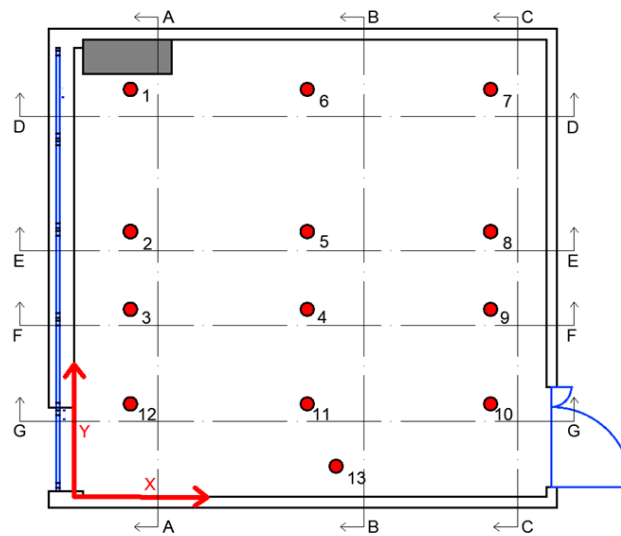


Figura 89. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: A-A; B-B; C-C

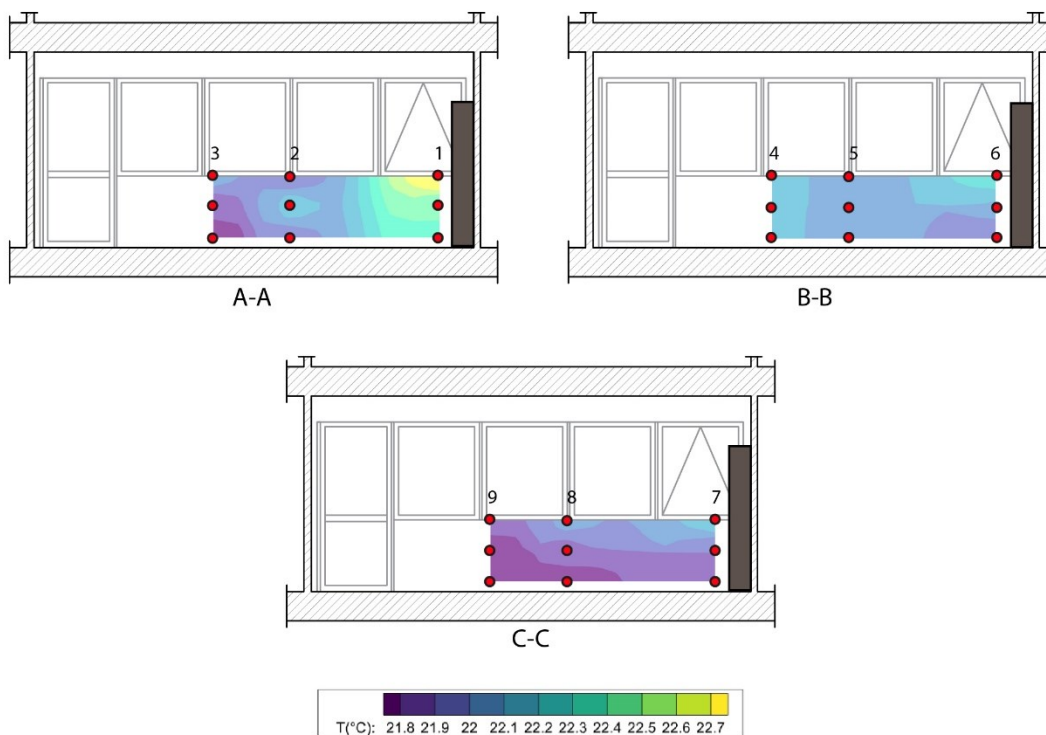


Figura 90. Sezioni parallele all'asse y con punti di presa

La Figura 90 mostra le 3 sezioni parallele al lato finestrato dell'aula di Falconara. Dalla sezione A-A, ovvero quella adiacente alla finestra, si nota che per tutti e 3 i punti la temperatura è maggiore a 110 cm e minore a 10 cm. Si registra la temperatura più elevata ad altezza 110 cm nel punto 1. Dalla sezione B-B i punti 4 e 5 registrano a tutte le altezze la stessa temperatura mentre il punto 6 ha una temperatura maggiore ad altezza 110 e minore a 10 cm. La sezione C-C ovvero quella più vicina alla parete opposta alla parete finestrata registra temperature molto più basse delle altre due sezioni probabilmente perché le sezioni A-A e B-B sono influenzate dalla presenza delle finestre che permette l'ingresso della radiazione solare e innalza la temperatura dell'aria interna.

-Sezioni parallele all'asse x

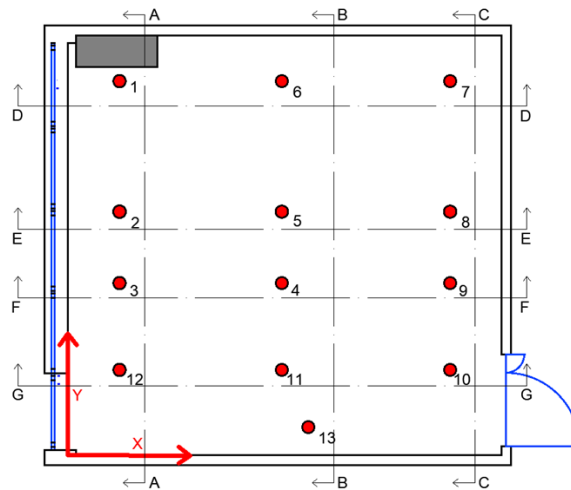


Figura 91. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: D-D; E-E; F-F.

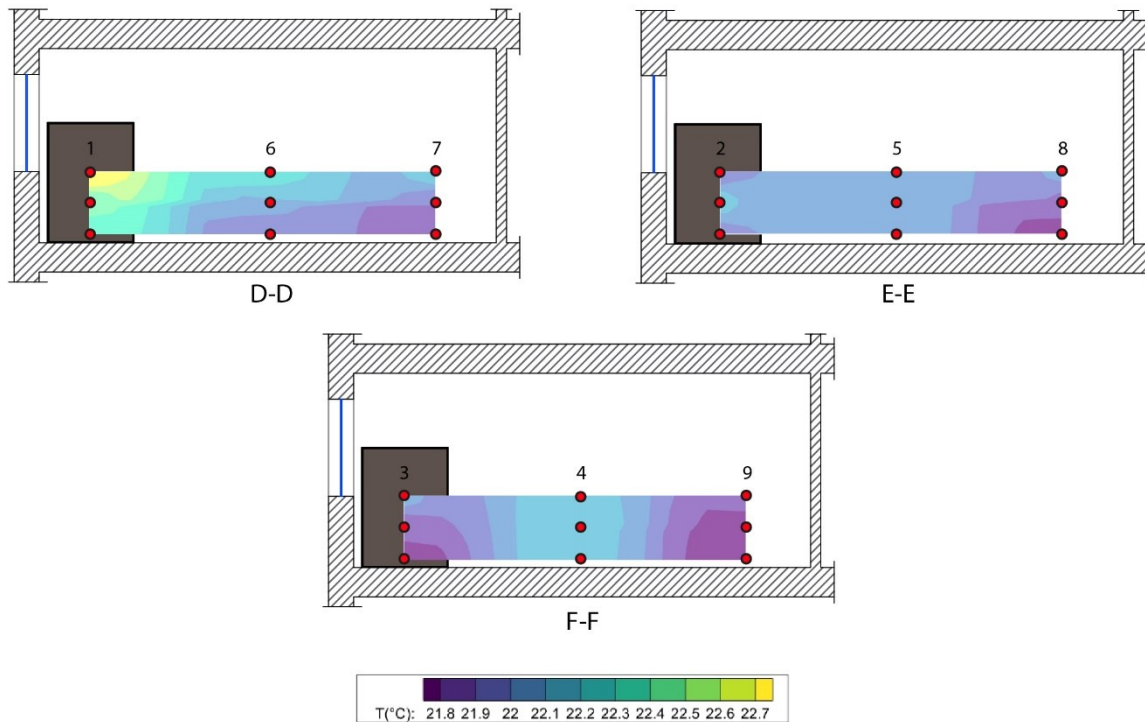


Figura 92. Sezioni parallele all'asse x con individuazione dei punti di presa

Dalla Figura 92 la sezione D-D è quella adiacente al lato dove si trova l'impianto di ventilazione e si nota una temperatura maggiore davanti all'impianto a 110 cm, la temperatura va poi diminuendo verso la parete opposta a quella finestrata e diminuisce verso il basso. La sezione E-E mostra il punto 5 a temperatura inalterata in altezza, il punto 2 subisce un aumento di temperatura a 60 cm mentre il punto 8 ha la temperatura massima a 110 cm pari a 22,3°C e la più bassa a 10 cm a 21,9°C. La sezione F-F mostra il punto centrale 4 ha stessa temperatura nelle tre altezze di presa a circa 22,5°C ed è la temperatura maggiore della sezione, ai lati la temperatura diminuisce nei punti di presa 3 e 9 seppur il punto 3 mostra una temperatura maggiore ad altezza 110 cm e poi va a decrescere in basso.

Velocità dell'aria

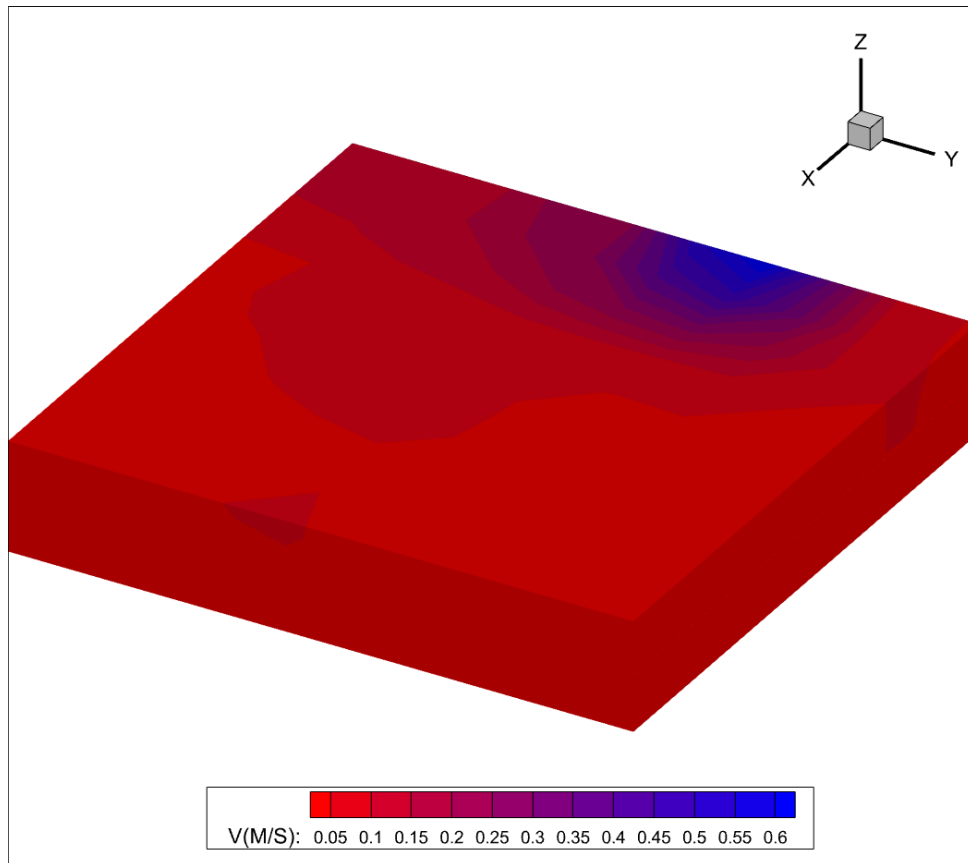


Figura 93. 3D Velocità dell'aria per tutti e 13 i punti di presa.

Si è proceduto in seguito ad analizzare i dati relativi alla velocità dell'aria all'interno dell'aula, sono stati considerati tutti i punti di acquisizione (13) nell'aula nel mese di maggio-luglio 2023. Ricordando che anche la velocità dell'aria così come la temperatura è acquisita alle 3 altezze di presa per ogni postazione della Dantec, inserendo i dati nel software Tecplot è stata ottenuta un'illustrazione tridimensionale dell'andamento della velocità dell'aria nell'aula. Dal 3D è stato possibile estrapolare delle sezioni lungo l'asse X, Y e Z che mostrano l'andamento della velocità dell'aria in planimetria e sezione 2D che verranno illustrate nel seguito.

Dal 3D (Figura 93) è possibile notare che per metà aula (zona opposta alla parete finestrata) la situazione è stabile con una velocità registrata alle 3 altezze stabile per tutti i punti a 0,1 m/s circa. L'altra metà dell'aula (zona antistante la finestra) invece ci mostra un'importante variazione di velocità dell'aria sicuramente dovuta alla presenza dell'impianto di ventilazione; infatti, durante le misurazioni nell'aula spostando lo strumento nelle posizioni antistanti l'impianto si percepiva una velocità dell'aria in mandata importante.

-Planimetrie

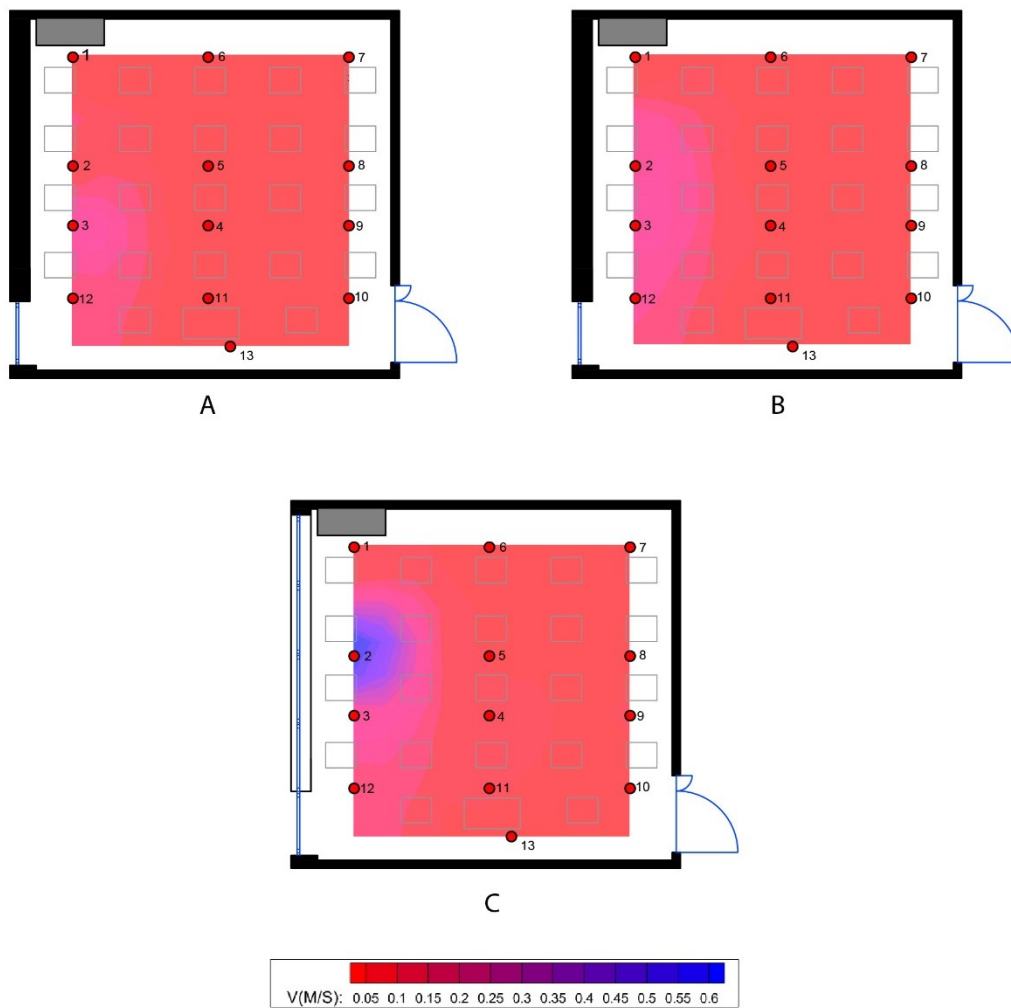


Figura 94. A planimetria a 0,10 m; B planimetria a 0,60 m; C planimetria a 1,1m

La Figura 94 mostra le planimetrie alle 3 altezze di presa della velocità dell'aria rispettivamente a 10 cm, 60 cm e 110 cm (A, B, C). Partendo dalla planimetria A, ovvero quella dei dati a 10 cm dal pavimento, la velocità dell'aria risulta costante per tutti i punti a 0,05 m/s eccetto nel punto 3 e 12 in cui la velocità dell'aria aumenta a 0,15 m/s; analizzando la planimetria B la velocità continua a mantenersi per tutti i punti a 0,05 m/s eccetto per i punti 2, 3 e 12 in cui la velocità dell'aria aumenta intorno a 0,15 m/s. Nella planimetria C a 110 cm tutti i punti registrano una velocità di 0,05 m/s eccetto i punti 2, 3 e 12 per i quali le velocità registrate sono state rispettivamente di: 0,6 m/s, 0,15 m/s e 0,10 m/s.

In generale ciò che emerge analizzando le tre planimetrie è che la velocità dell'aria è sempre costante in tutte le zone dell'aula eccetto nell'area antistante l'impianto di ventilazione in cui la velocità dell'aria è massima nel secondo punto di presa davanti all'impianto e nella zona più alta quindi ad altezza del capo dell'utente che si trova in quella posizione.

-Sezioni parallele all'asse y

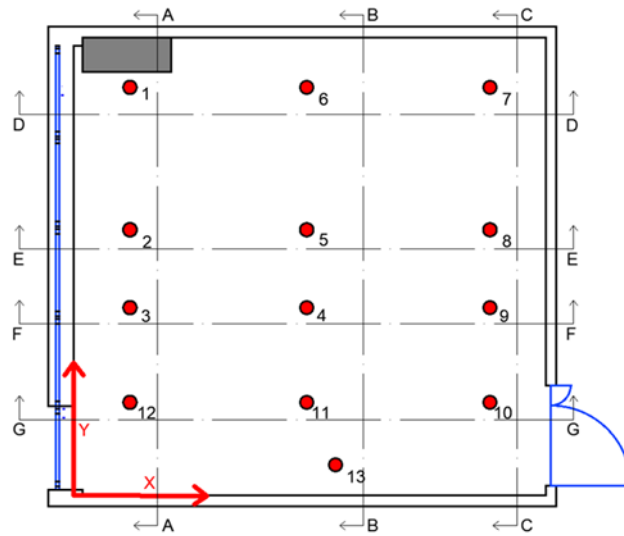


Figura 95. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: A-A; B-B; C-C

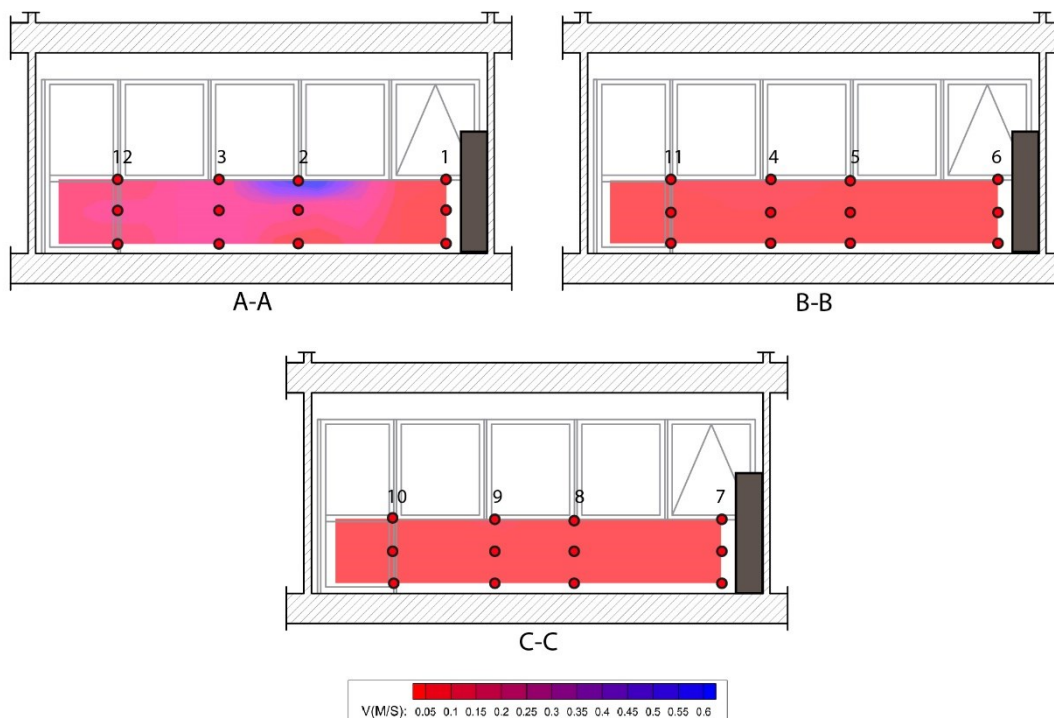


Figura 96. Sezioni parallele all'asse y con punti di presa

Dalle sezioni parallele all'asse y (Figura 96), ovvero quelle parallele alla parete finestrata, nella sezione A-A emerge una velocità massima pari a 0,6 m/s a 110 cm da terra nel punto di presa 2 questo si può spiegare perché probabilmente le bocchette dell'impianto di ventilazione sono alte e dunque la velocità dell'aria di immissione non viene percepita subito davanti alla macchina ovvero nella postazione 1 ma nella posizione successiva, cioè la 2, e poi la velocità va via via diminuendo più ci si allontana dall'impianto. Si registrano invece velocità dell'aria costanti a 0,05 m/s nelle altre due sezioni B-B e C-C.

-Sezioni parallele all'asse x

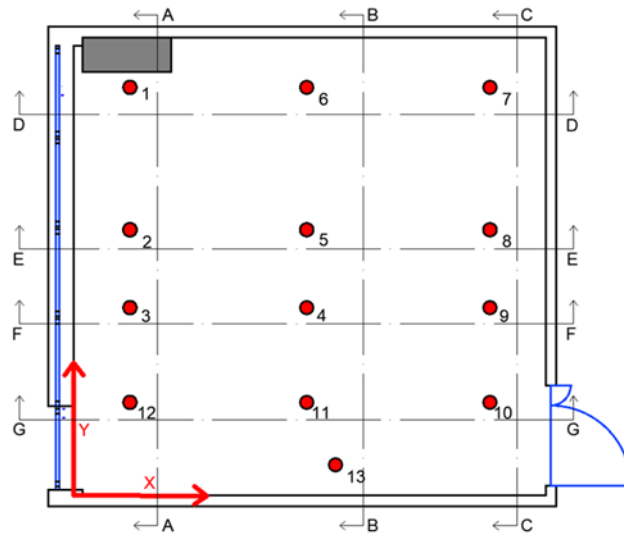


Figura 97. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: D-D; E-E; F-F; G-G

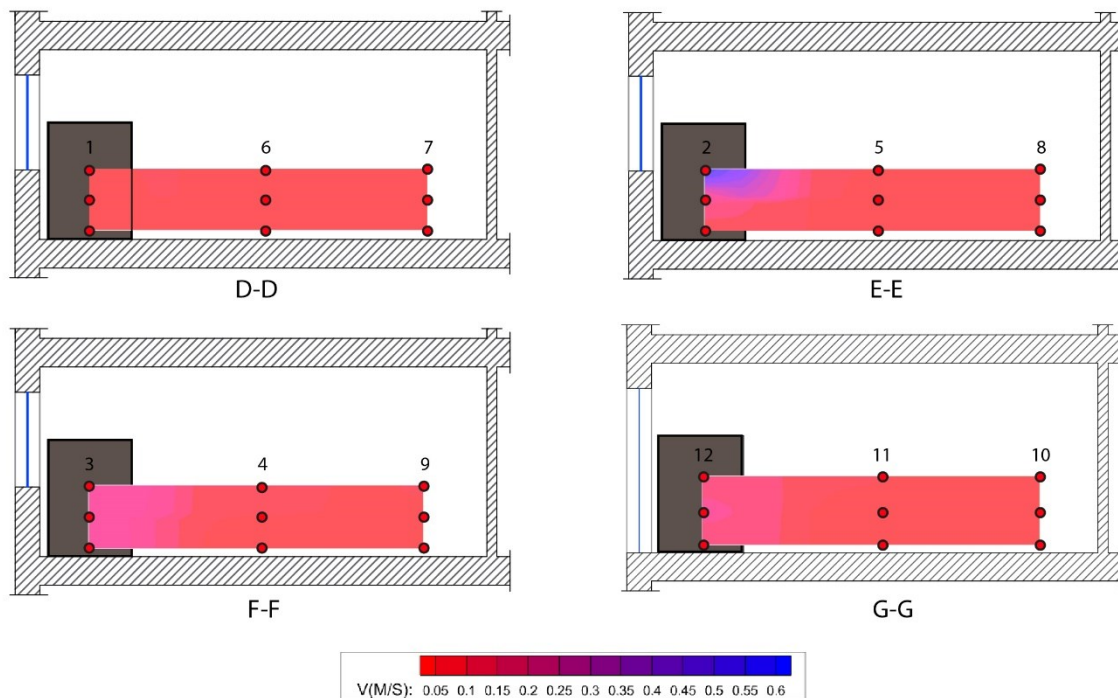


Figura 98. Sezioni parallele all'asse x con individuazione dei punti di presa

Le sezioni parallele all'asse x illustrate in Figura 98 mostrano che la prima sezione D-D antistante l'impianto risulta avere una velocità pari a 0,05 m/s per tutti i punti a tutte le altezze. La sezione E-E mostra l'innalzamento della velocità dell'aria al punto 2 a 110 cm e 60 cm da terra mentre restano invariate le velocità dell'aria negli altri due punti 5 e 8. La sezione F-F mostra che il punto 3 ha la stessa velocità dell'aria alle 3 altezze pari a 0,15 m/s circa mentre i punti 4 e 9 rimangono a 0,05 m/s. Anche nella sezione G-G il punto 12 risulta avere una velocità dell'aria maggiore pari a circa 0,1 m/s rispetto agli altri due punti 11 e 10 dove continua ad esserci una velocità di 0,05 m/s.

Draught Rate

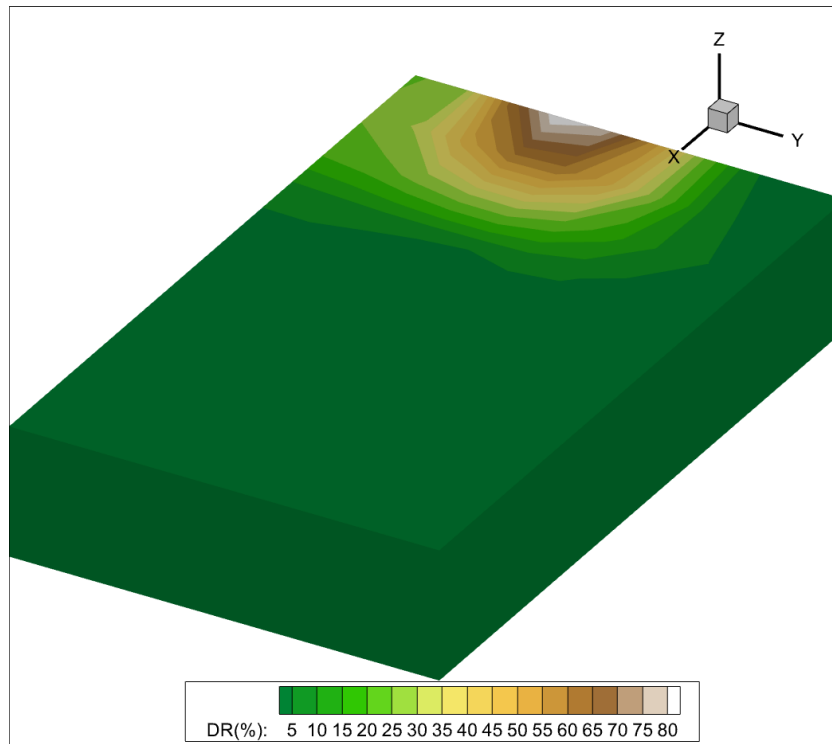


Figura 99.3D Draught Rate per i primi 9 punti di presa

Il draught rate è un indice che valuta il disagio da correnti d'aria, questo valore dipende dalla temperatura dell'aria, velocità dell'aria e dalla turbolenza e per questo sono stati analizzati solo i primi 9 punti di presa registrati a maggio. Dalla Figura 99 è evidente un disagio da corrente d'aria nella zona antistante l'impianto di ventilazione che andremo ad approfondire sia con le planimetrie che con le sezioni nel seguito.

-Planimetrie

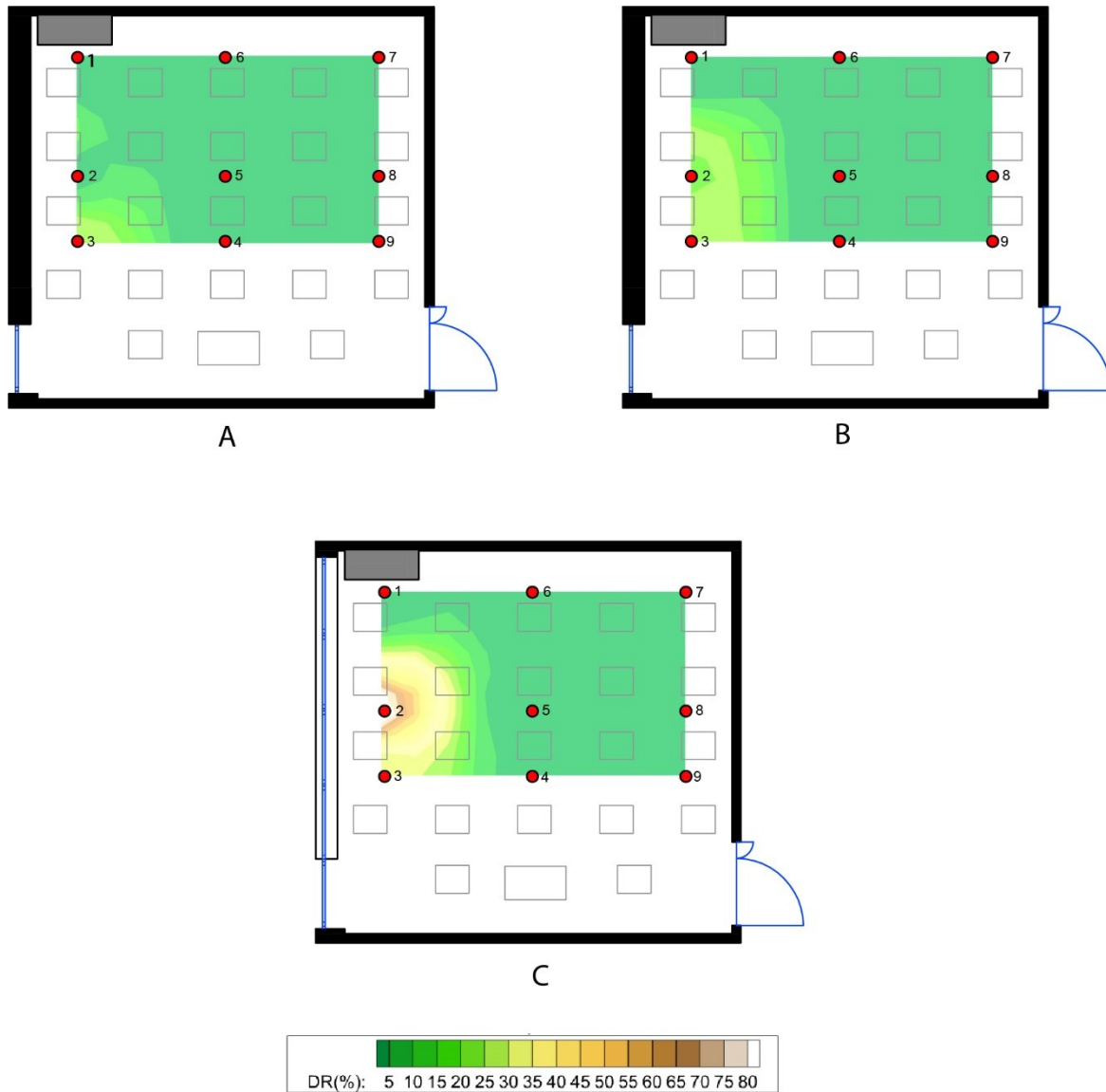


Figura 100. A planimetria a 0,10 m; B planimetria a 0,60 m; C planimetria a 1,1m

Dalla Figura 100 si notano gli andamenti del Draught Rate valutato a 10 cm A; 60 cm B e 110 cm C. A 10 cm il disagio da correnti d'aria è evidente al punto 3 intorno al 30%. Per tutti gli altri punti invece il disagio è di circa il 5%. A 60 cm il Draught Rate per i punti 3 e 4 è del 30 % dunque rispetto alla configurazione della planimetria A, cioè a 10 cm da terra, nella planimetria B il discomfort dovuto a correnti d'aria aumenta avvicinandoci all'impianto di ventilazione. Nella planimetria C, ovvero a 110 cm da terra il Draught Rate registrato risulta dell'80% nel punto 2 e diminuisce al 40% nel punto 3. Per tutti gli altri punti il Draught Rate rimane costante al 5% anche nel punto 1 antistante l'impianto di ventilazione perché in quel punto non arrivano correnti d'aria che provocano discomfort all'utente.

-Sezioni parallele all'asse y

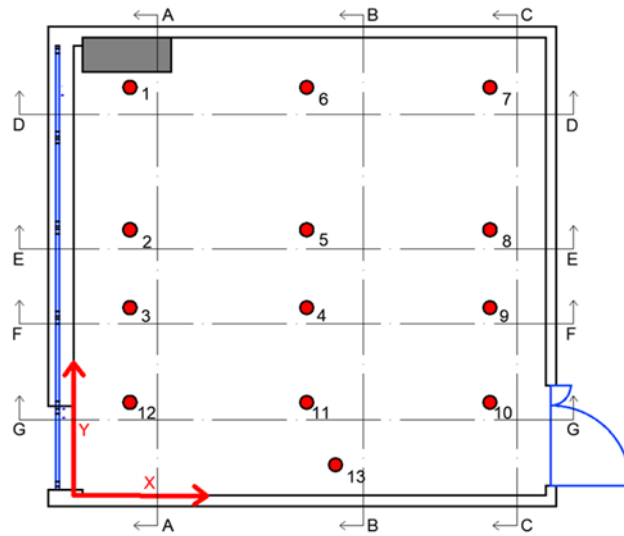


Figura 101. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: A-A; B-B; C-C

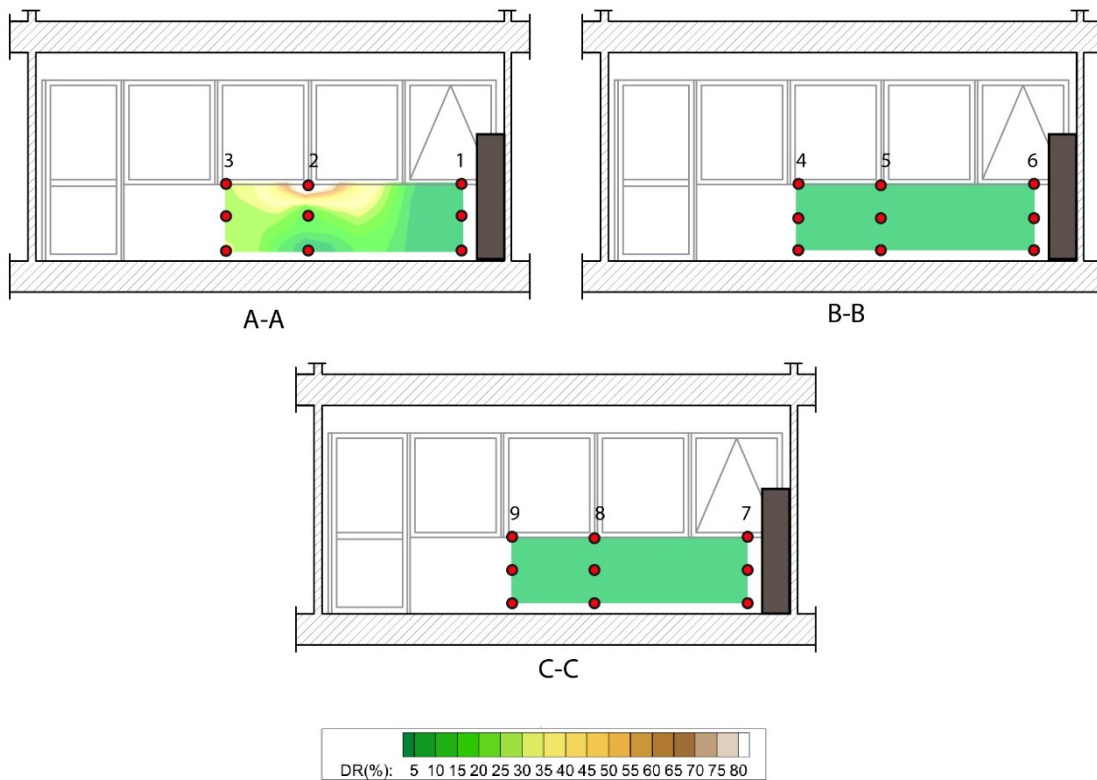


Figura 102. Sezioni parallele all'asse y con punti di presa

La Figura 102 mostra le sezioni parallele all'asse y; nella sezione A-A si nota il punto 1 con una percentuale di DR pari al 5%, invece i punti 2 e 3 mostrano percentuali di discomfort dovuto a correnti d'aria maggiori nella zona a 110 cm e vanno via via diminuendo scendendo verso il pavimento, quindi gli utenti che si trovano nei banchi davanti l'impianto di ventilazione nei pressi dei punti 2 e 3 noteranno correnti d'aria a livello del capo. Per le altre due sezioni il Draught Rate risulta in tutti i punti e a tutti i livelli costante minore del 5%.

-Sezioni parallele all'asse x

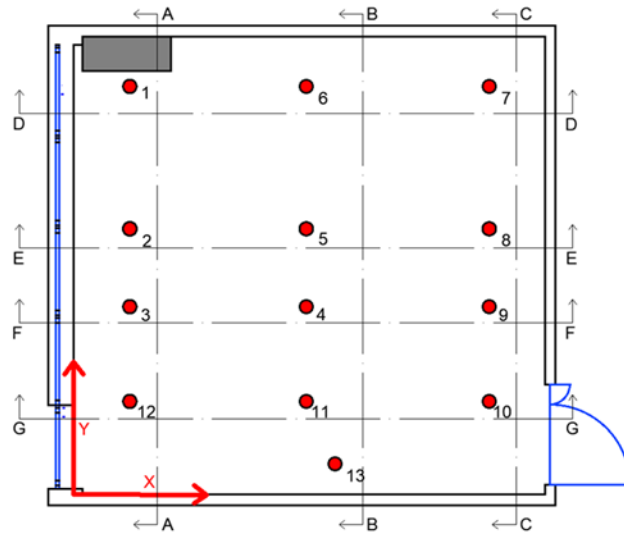


Figura 103. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: D-D; E-E; F-F

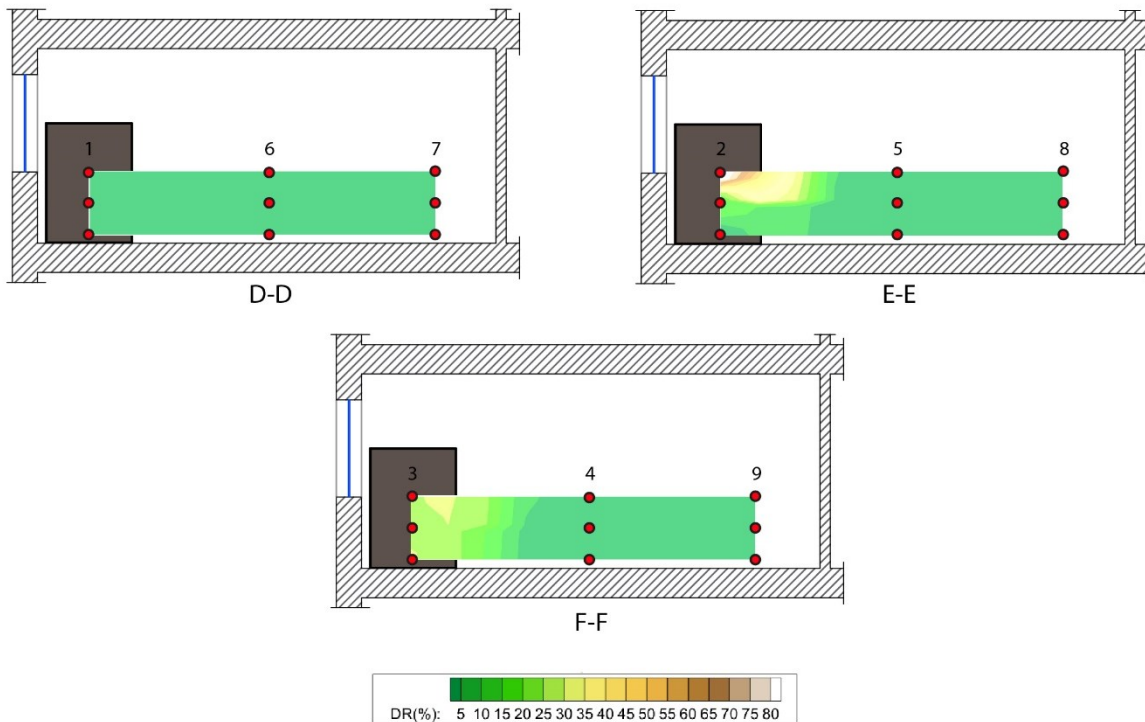


Figura 104. Sezioni parallele all'asse x con individuazione dei punti di presa

Per le sezioni parallele all'asse x (Figura 104), la sezione più vicina all'impianto D-D non registra un Draught Rate significativo, infatti, i valori per tutti i punti sono del 5%, la sezione E-E registra livelli elevati del Draught Rate nel punto 2 che è massimo a 110 cm e minimo a 10 cm; infatti, in questo punto la velocità dell'aria registrata dallo strumento era massima. Nella sezione F-F il punto 3 registra una percentuale di discomfort per correnti d'aria pari al 35% circa mentre i punti 4 e 9 sono stabili con un DR del 5%.

Temperatura Operativa

-Planimetria

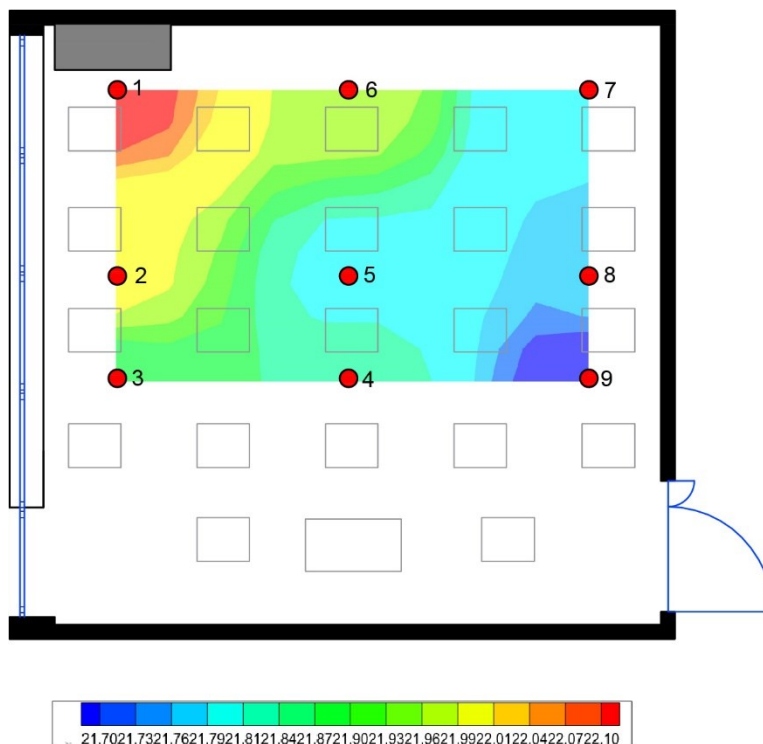


Figura 105. Planimetria della Temperatura Operativa su 9 punti di presa

La temperatura operativa è registrata con un globo termometro posto a 45° e a 60 cm da terra e simula l'utente in posizione seduta. Per questo motivo per la temperatura operativa viene proposta in una planimetria (Figura 105) in cui i punti di presa sono 9 ovvero le posizioni registrate con la Dantec Comfortsense a maggio 2023. Ciò che si nota è che il punto 1 davanti all'impianto di ventilazione è quello che registra una temperatura operativa maggiore, allontanandoci dall'impianto di ventilazione, punti 2 e 3 la temperatura operativa va man mano decrescendo e passa da 22°C a $21,85^\circ\text{C}$ circa. Allontanandoci dalla parete finestrata la temperatura operativa scende, infatti, sono registrati valori minimi nel punto 9 pari a $21,7^\circ\text{C}$. La temperatura operativa, in generale, varia di poco infatti la scala di valori è tra $21,7^\circ\text{C}$ e $22,10^\circ\text{C}$.

Considerando che la temperatura operativa dipende dalla temperatura dell'aria e dalla temperatura media radiante, probabilmente la vicinanza con le finestre incide sui valori registrati in quanto risultano essere maggiori vicino alla finestra e minori sul lato opposto, così come è stato visto per le mappe termiche della temperatura dell'aria.

PMV E PPD

-Planimetria

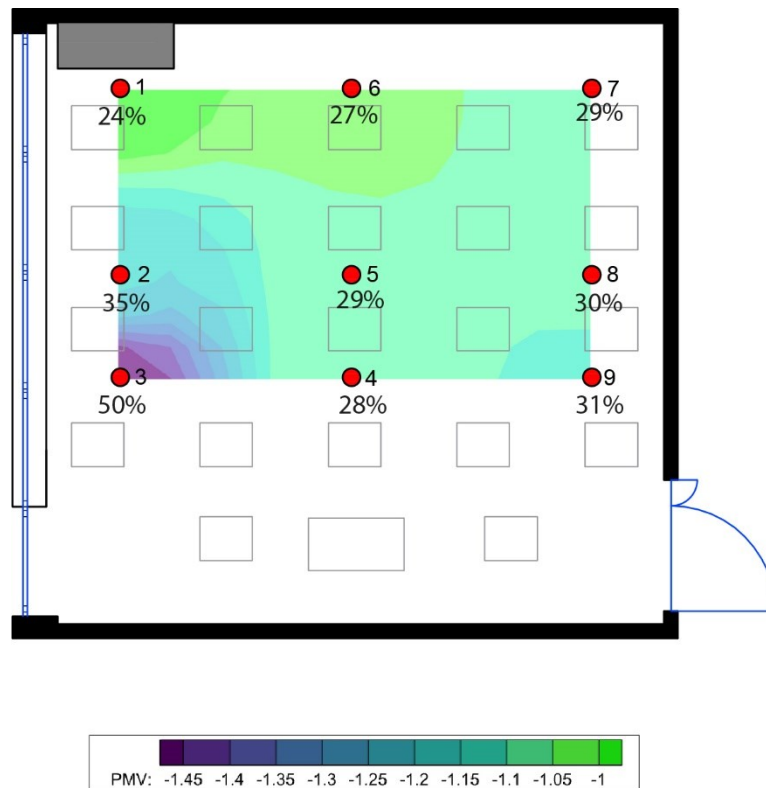


Figura 106. Planimetria del PMV per 9 punti di presa e indicazione del PPD per ogni punto

Dalla planimetria in Figura 106 sono riportati i 9 punti di presa del PMV e il PPD è riportato come percentuali accanto ad ogni postazione. Il PMV è un indice che ci permette di capire se un ambiente è termicamente confortevole. Tale indice va da +3 (molto caldo) a -3 (molto freddo) e lo 0 è la condizione di neutralità. Il PPD invece è la percentuale di utenti insoddisfatti. Valutando i dati illustrati nella planimetria, il PMV registrato all'interno dell'aula varia tra -1,45 e -1 ciò vuol dire che siamo nella fascia del leggermente freddo-freddo. La zona con più discomfort è quella del punto 3 dove si registra un PMV di -1,45 e un PPD del 50% ciò vuol dire che in quella zona la metà degli utenti è in una condizione di discomfort termico. Il punto 1 invece è quello con minor discomfort, infatti, il PMV è pari a -1 e la percentuale di utenti insoddisfatti è del 24% ovvero la più bassa rispetto a tutti i punti di acquisizione. Il punto 2 ha un PMV di -1,2 e una percentuale di insoddisfatti del 35%. Nei punti 2 e 3, dove la velocità dell'aria risulta massima, anche la percentuale di insoddisfatti e il PMV sono massimi e questo è dovuto all'impianto di ventilazione. Nella zona centrale della classe i punti 4 e 5 registrano un PMV di -1,1 e un PPD rispettivamente di 28% e 29%. Il punto 6 invece ha un PMV di -1,05 e un PPD del 27%. Anche i punti 7 e 8 registrano un PMV di -1,1 e un PPD rispettivamente del 29% e 30%. Il punto 9 infine ha un PMV di -1,15 e un PPD pari al 31%.

Recanati

Così come l'analisi effettuata a Falconara, anche a Recanati la temperatura dell'aria, il draught rate, la temperatura operativa, il PMV e il PPD sono stati considerati solo i primi 6 punti rilevati a maggio in quanto non si poteva disporre della totalità dei punti perché rilevati in mesi diversi e dunque con temperature diverse quindi si è optato per considerare quelli di maggio perché i punti risultano tutti ravvicinati tra di loro. Per la velocità dell'aria invece stati utilizzati tutti i punti di presa (maggio e giugno) perché non c'è diretta dipendenza con dati registrati in periodi diversi. L'impianto di ventilazione durante queste acquisizioni di dati era acceso a velocità 3.

Di seguito è riportata una planimetria dell'aula di Recanati con individuazione di tutti i punti di presa nei quali la Dantec ha acquisito dati alle 3 altezze di 10 cm (caviglie), 60 cm (bacino) e 110 cm (testa) e le sezioni che sono state ricavate. (Figura 107)

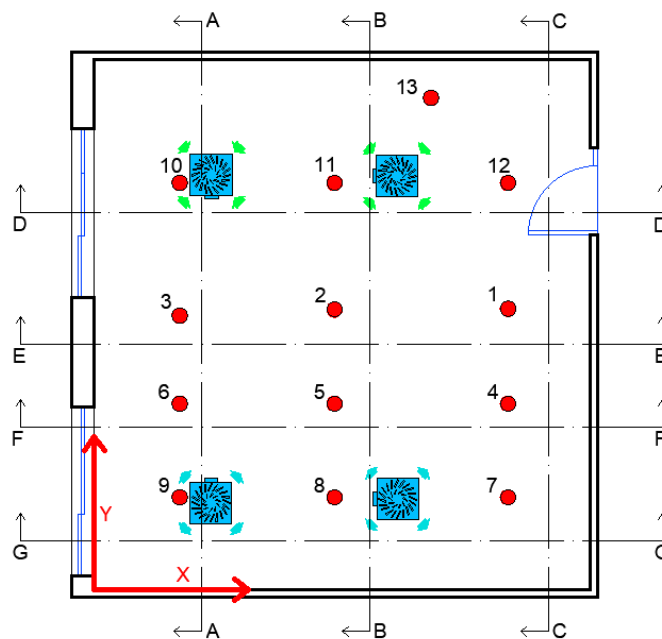


Figura 107. Planimetria aula 10 Recanati con individuazione di tutti i punti di presa, sezioni e impianto di ventilazione con mandata e ripresa aria

Temperatura dell'aria

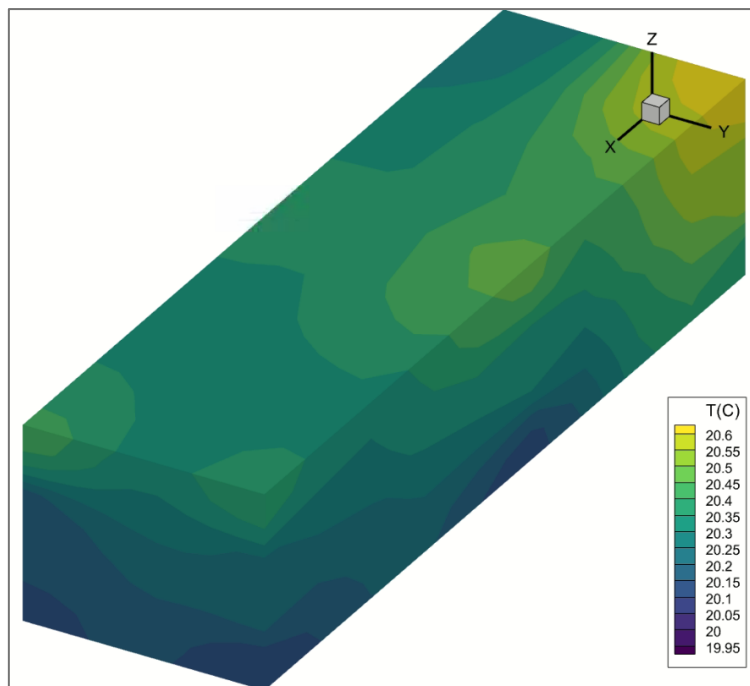


Figura 108.3D Temperatura per i primi 6 punti di presa

L'immagine 3D in Figura 108 mostra la temperatura dell'aria registrata dalla Dantec in 6 punti di presa nell'aula di Recanati. Per tutti i punti acquisiti, la temperatura dell'aria è maggiore a quota 110 cm da terra e nella zona più vicina alla finestra mentre è più bassa a 10 cm da terra, questo potrebbe essere dovuto alla vicinanza con le finestre che permettono l'ingresso della radiazione solare.

-Planimetrie

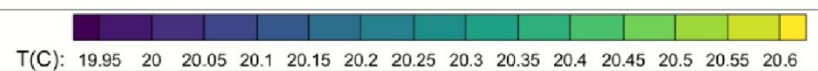
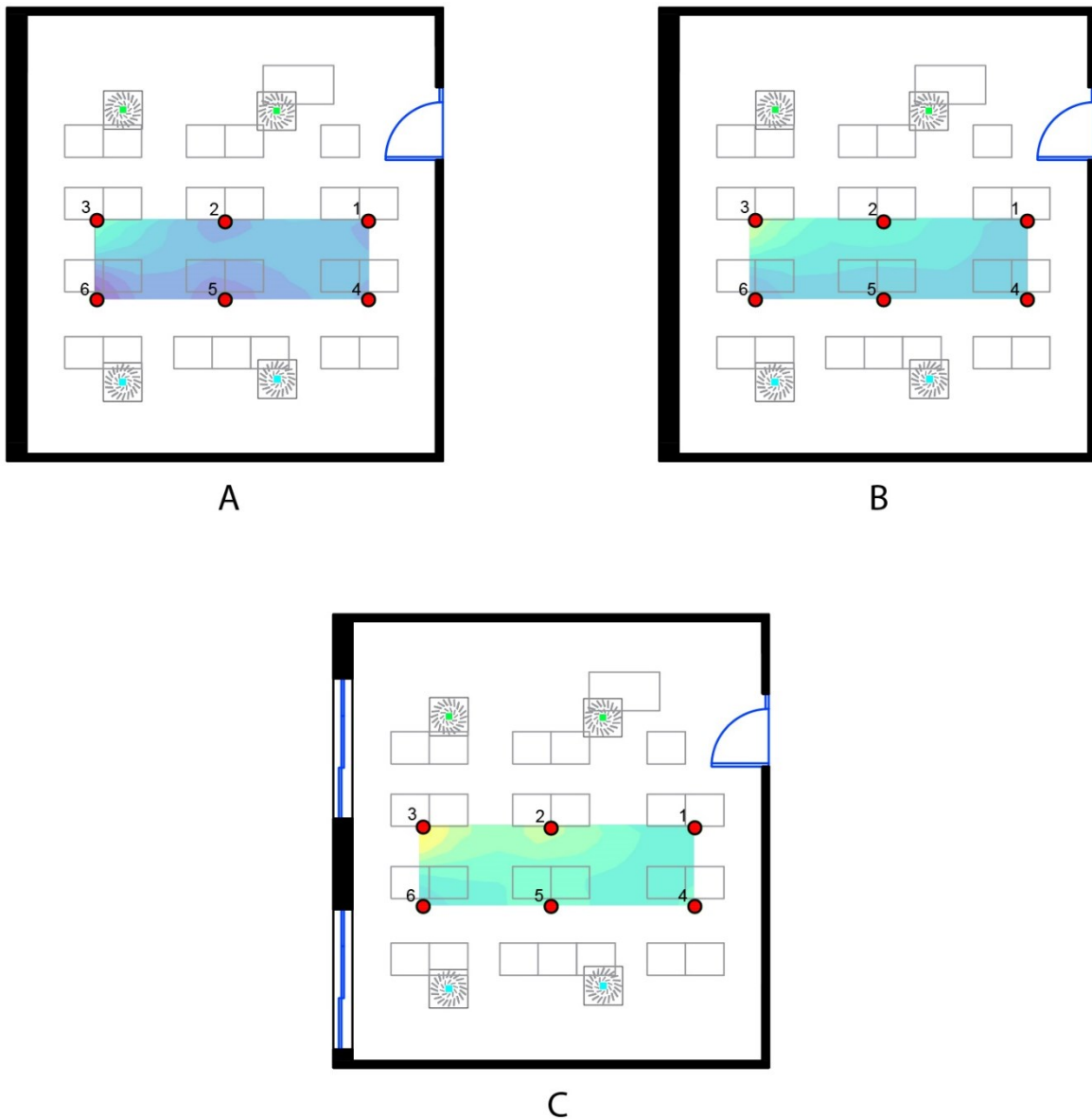


Figura 109. A planimetria a 0,10 m; B planimetria a 0,60 m; C planimetria a 1,1m

Dalle planimetrie in Figura 109 si registra a 10 cm da terra (A) una temperatura di 20,4°C al punto 3 e 20,05°C in tutti gli altri punti. Dalla planimetria (B) a 60 cm il punto 3 registra una temperatura di 20,5°C e man mano che ci si allontana dal lato finestrato la temperatura diminuisce a 20,4°C al punto 2 e 20,3°C al punto 1. I punti 4, 5 e 6 alla stessa quota, registrano 20,3°C. Nella planimetria C, a 110 cm da terra, la temperatura dell'aria maggiore si registra nel punto 3 pari a 20,6°C al punto 2 la temperatura scende a 20,45°C e anche al punto 1 dove si registrano 20,3°C. I punti 4, 5 e 6 sono tutti a 20,3°C. Questo è probabilmente dovuto al fatto che la radiazione solare entra dalla finestra e i punti più vicini ad essa registrano temperature dell'aria maggiori.

-Sezioni parallele all'asse y

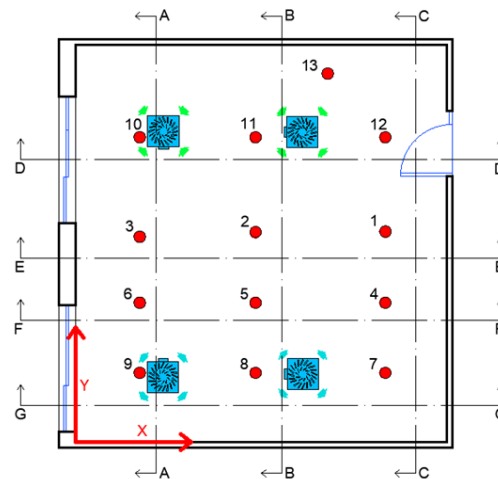


Figura 110. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: A-A; B-B; C-C

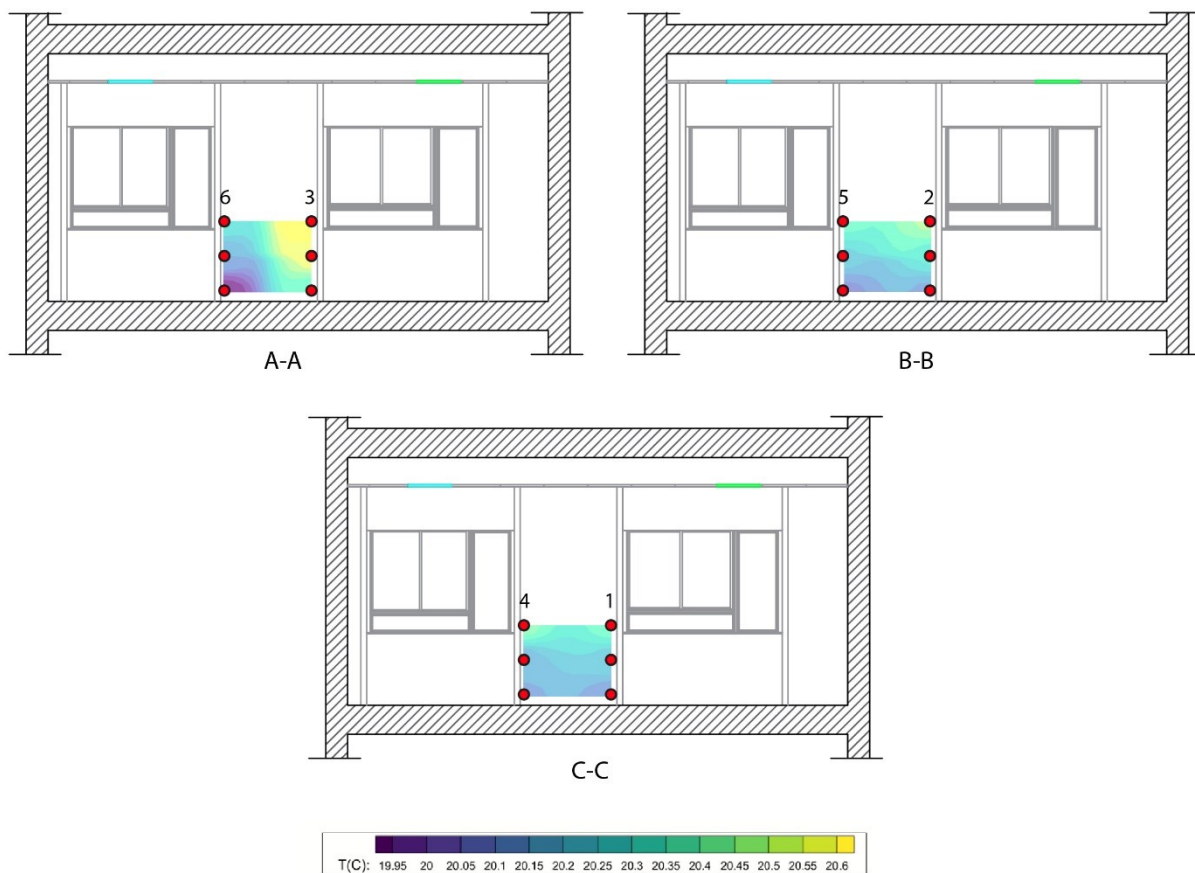


Figura 111. Sezioni parallele all'asse y con punti di presa

Le sezioni parallele all'asse y, ovvero parallele al lato finestrato dell'aula, ci mostrano che nella sezione A-A, più vicina alla finestra, la temperatura è massima a 110 cm nel punto 3 e minima a 10 cm nel punto 6. La sezione B-B mostra che la temperatura è più alta a 110 cm per entrambi i punti 2 e 5 ed è pari a 20,4°C circa e decresce avvicinandosi al pavimento fino ad arrivare a 20,2°C. Anche per la sezione C-C si registra una temperatura maggiore a 110 cm e via via decresce andando verso il basso.

-Sezioni parallele all'asse x

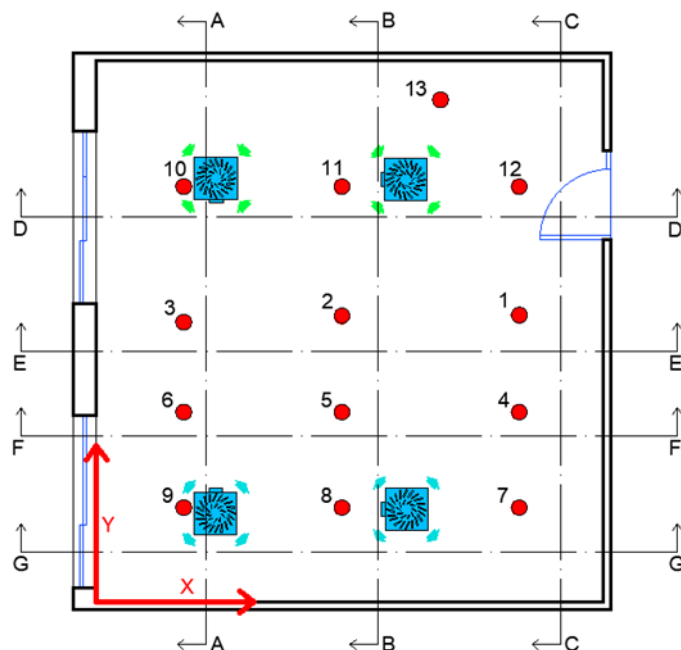


Figura 112. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: E-E; F-F

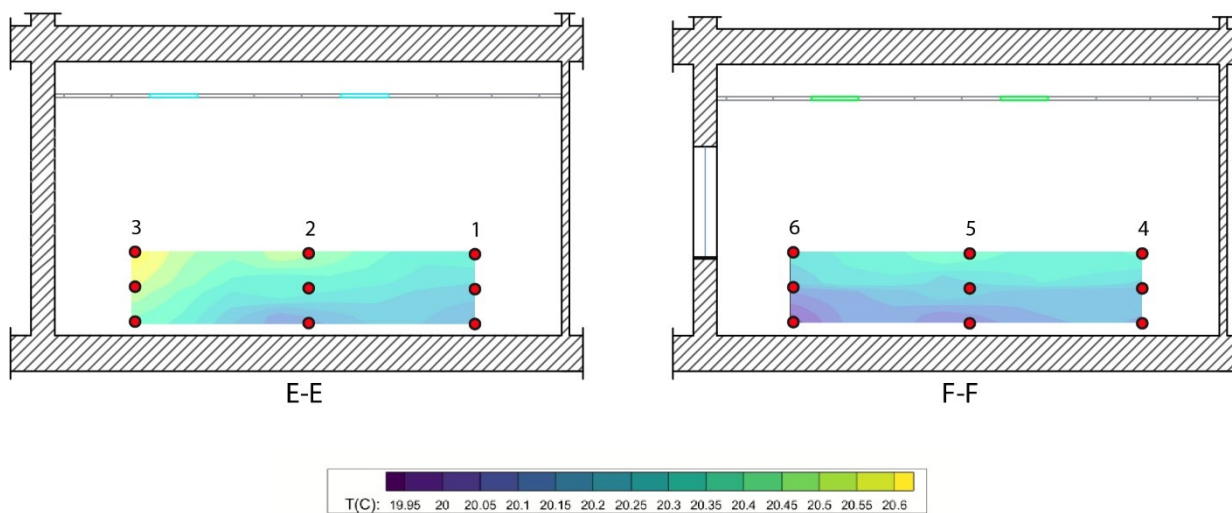


Figura 113. Sezioni parallele all'asse x con individuazione dei punti di presa

Le sezioni parallele all'asse x (Figura 113), registrano dati nella zona centrale dell'aula indicativamente tra le bocchette di mandata e ripresa, la sezione E-E mostra una temperatura massima a 20,6°C nel punto 3 a 110 cm, la temperatura va via via decrescendo verso il basso e allontanandosi dalla parete finestrata. Nella sezione F-F si nota invece che la zona più fredda è quella a 10 cm con una temperatura di 20,05°C e per tutti i punti andando verso l'alto la temperatura aumenta ma è stabile a circa 20,4°C. Nella sezione F-F non si registra una variazione delle temperature dell'aria allontanandosi dalle finestre.

Velocità dell'aria

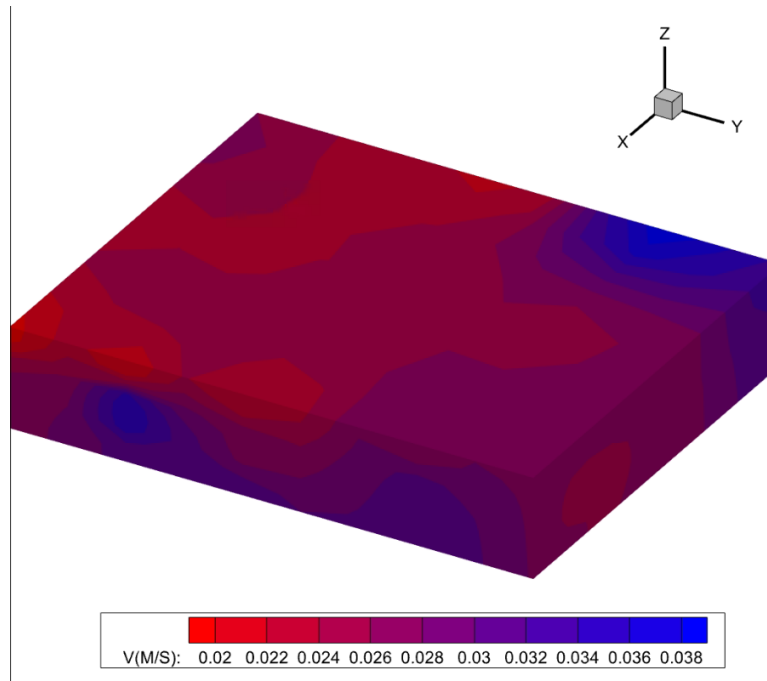


Figura 114.3D Velocità dell'aria per tutti e 13 i punti di presa

La velocità dell'aria viene acquisita in tutti e 13 i punti di presa nell'aula di Recanati con la Dantec, visionando il 3D in Figura 114 si nota una velocità massima in corrispondenza della bocchetta di ripresa dell'aria dell'impianto. Sotto le bocchette di mandata invece la velocità dell'aria è minore.

-Planimetrie

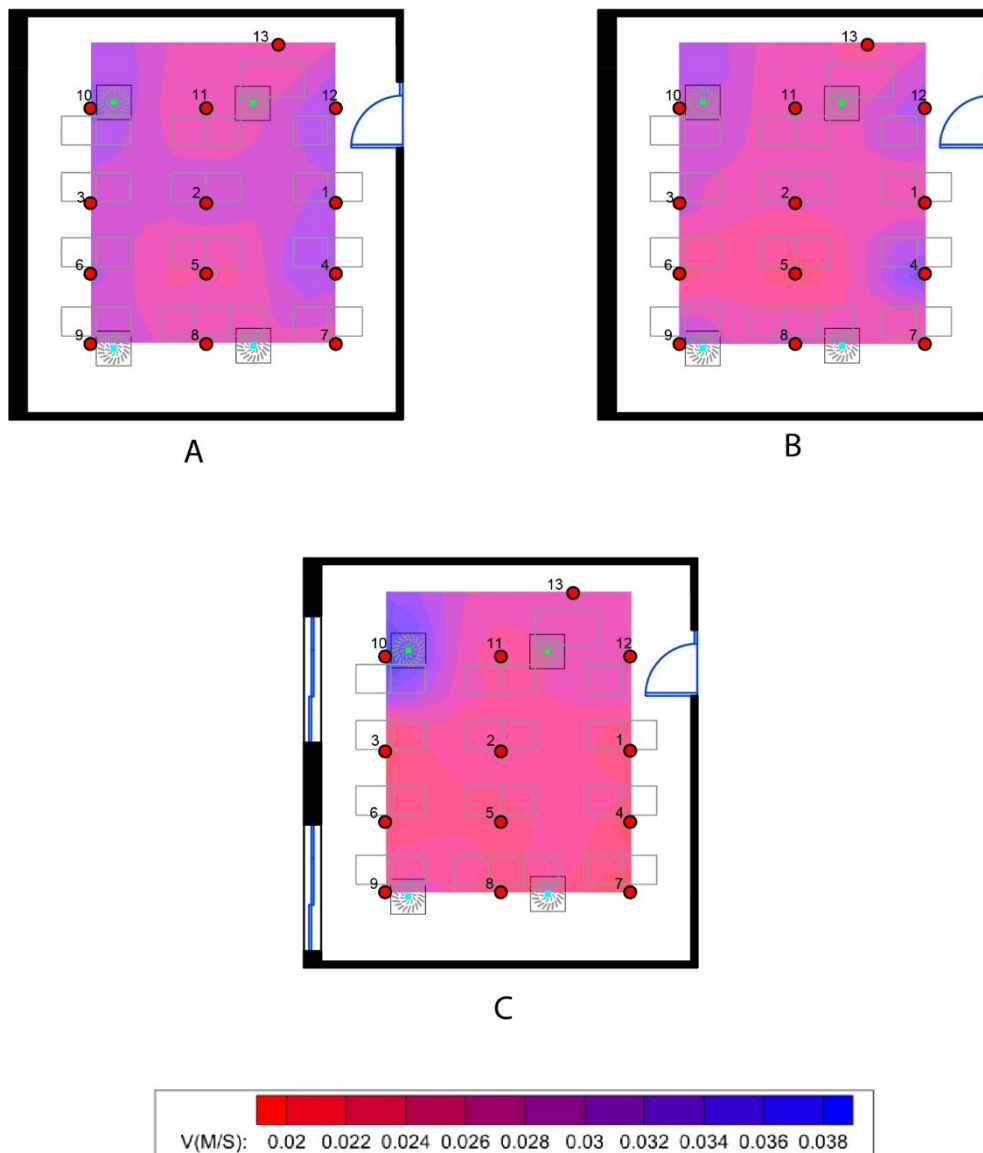


Figura 115. A planimetria a 0,10 m; B planimetria a 0,60 m; C planimetria a 1,1m

Dalle planimetrie alle 3 altezze per quanto riguarda la velocità dell'aria, si nota che a 10 cm da terra (A), la velocità dell'aria è massima nei punti 10, 12, 1 e 4 con valori di 0,034m/s. Nella zona centrale la velocità dell'aria diminuisce a 0,03 m/s. A 60 cm (planimetria B), la velocità dell'aria diminuisce nella zona centrale rispetto a quella registrata nella planimetria a 10 cm. I valori massimi di velocità sono registrati nei punti 4, 9, 10 e 12. A 110 cm (C) si nota la massima velocità dell'aria in corrispondenza della bocchetta di ripresa vicino alla finestra sul punto di presa numero 10 con velocità registrata pari a 0,038 m/s. Allontanandosi dal punto 10, perpendicolarmente alla parete finestrata, la velocità dell'aria diminuisce eccetto nel punto 12 dove c'è l'altra bocchetta di ripresa in cui la velocità dell'aria è più alta.

-Sezioni parallele all'asse y

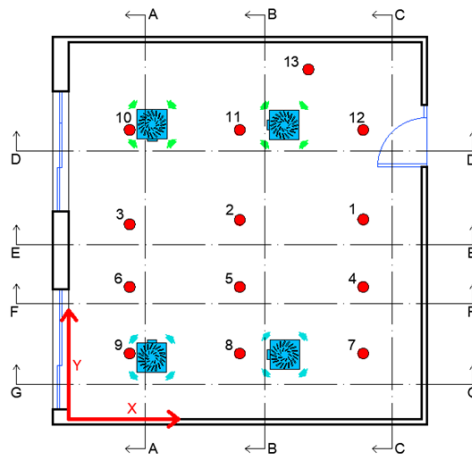


Figura 116. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: A-A; B-B; C-C

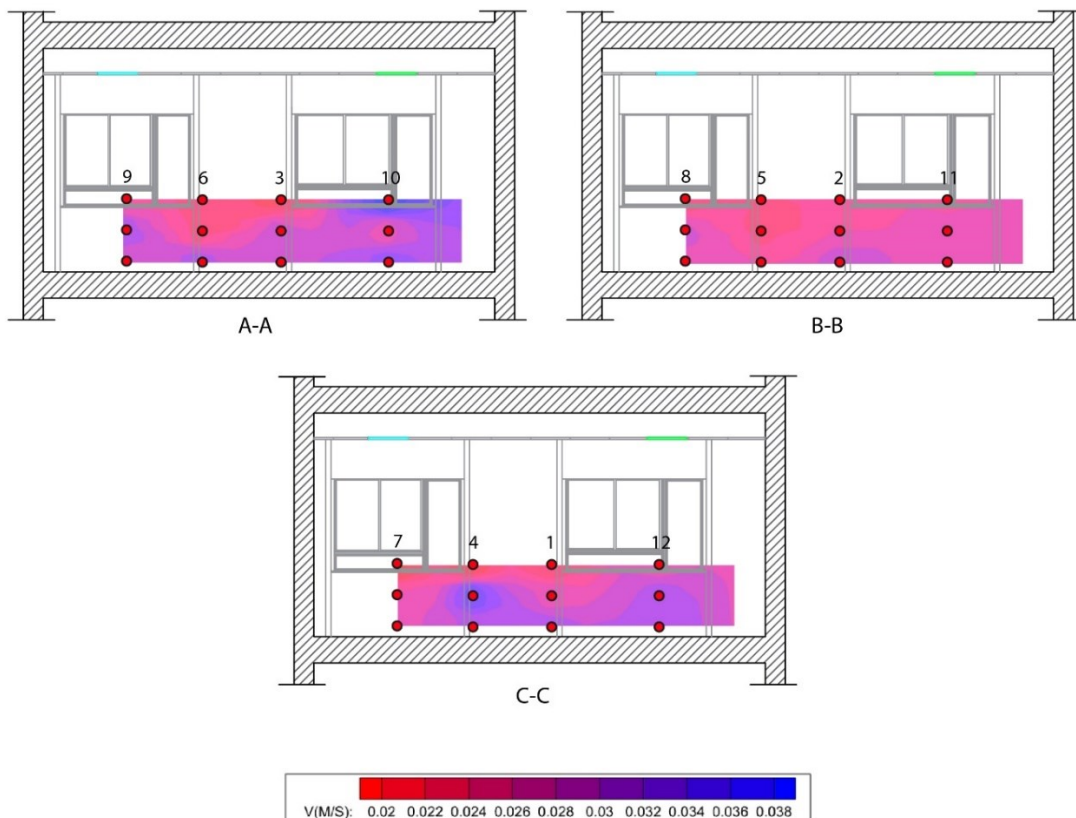


Figura 117. Sezioni parallele all'asse y con punti di presa

Le sezioni in Figura 117 mostrano la velocità dell'aria registrata con la Dantec, gli andamenti della velocità per tutte le sezioni si estendono rispetto ai punti 10, 11 e 12 perché viene registrata la velocità dell'aria anche nel punto 13 che si trova oltre tali punti (zona cattedra). Dalla sezione A-A la velocità risulta essere massima a 110 cm sul punto 10, e a 10 cm dello stesso punto. I punti centrali della medesima sezione (6 e 3) sembrano avere a 110 cm una velocità costante pari a 0,022 m/s. Sembrerebbe quindi che la velocità dell'aria sia elevata a 60 cm del punto 9 continua ad avere quella stessa velocità a 10 cm dei punti 6 e 3 e poi al punto 10 aumenta anche a 110 cm. Questo fenomeno è quasi sicuramente dovuto alle due bocchette di mandata (in corrispondenza del punto 9) e ripresa (in

corrispondenza del punto 10). La sezione B-B mostra lo stesso andamento della sezione A-A quindi la velocità è più elevata a 60 cm del punto 8, la stessa velocità è rilevata a 10 cm dei punti 5 e 2 e nel punto 11 la stessa velocità è registrata a 110 cm segno del fatto che la ripresa dell'impianto provoca un innalzamento di velocità. Essendo la sezione B-B centrale all'aula e dunque più distante dall'impianto rispetto alla sezione A-A, i valori registrati della velocità dell'aria sono più bassi rispetto a quelli della prima sezione. La sezione C-C mostra valori elevati di velocità dell'aria a 60 cm del punto 4, continua ad essere alta spostandosi a 10 cm sul punto 1 e nel punto 12 la velocità aumenta anche a 60 cm e 110 cm ciò ci individua il funzionamento della bocchetta della ripresa.

-Sezioni parallele all'asse x

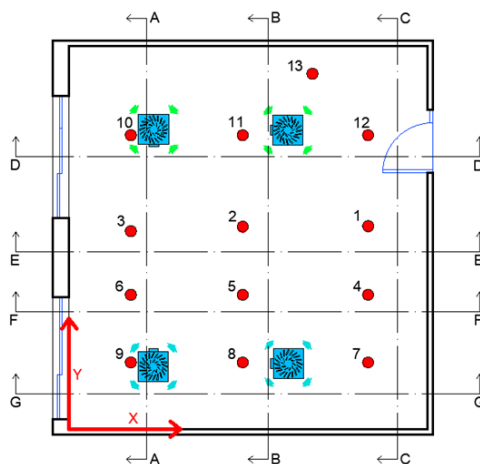


Figura 118. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: D-D; E-E; F-F; G-G

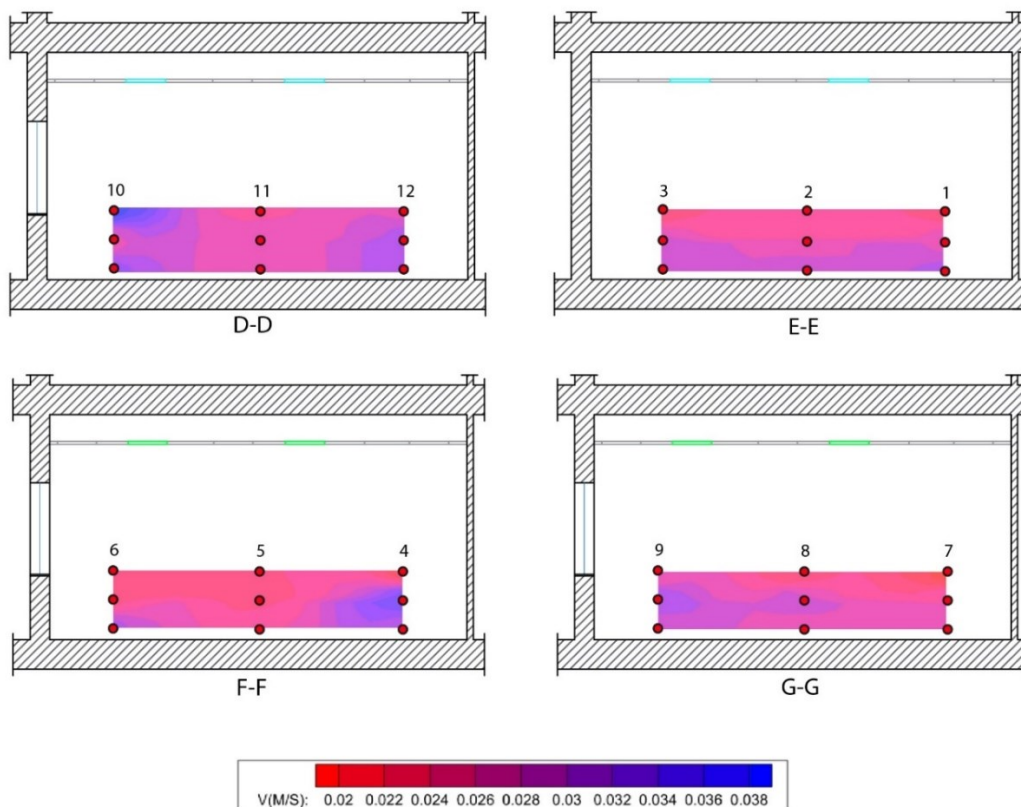


Figura 119. Sezioni parallele all'asse x con individuazione dei punti di presa

Le sezioni in Figura 119 mostrano che la velocità dell'aria è massima nei punti di acquisizione sotto le bocchette dell'impianto dedicate alla ripresa dell'aria; la sezione D-D infatti mostra una velocità massima a 110 cm sul punto 10 e anche a 10 cm dello stesso punto seppur con valore più basso e a 60 cm e 10 cm del punto 12. La sezione E-E posta a metà dell'aula ci fa notare una velocità minima dell'aria a 110 cm di altezza dal pavimento e va aumentando verso il basso in modo graduale con una velocità massima costante per tutti i punti di presa a 10 cm pari a 0,03 m/s. La sezione F-F ci mostra una velocità elevata nella posizione 4 a 60 cm e 10 cm dal pavimento e ciò è probabilmente dovuto alla bocchetta di mandata più vicina. Anche a 10 cm del punto 6 si registra un aumento di velocità. Nel punto centrale della sezione la velocità è circa costante a tutte le altezze segno che non si percepisce la presenza di corrente d'aria dovuta all'impianto. La sezione G-G ovvero quella più vicina all'impianto di mandata ci illustra una velocità dell'aria elevata a 60 cm nel punto 9 e a 60 cm nel punto 8. Il punto 7 invece non registra variazioni di velocità importanti tra le 3 altezze probabilmente perché la velocità dell'aria in mandata della bocchetta più vicina non è percepita in quel punto perché troppo distante.

Draught Rate

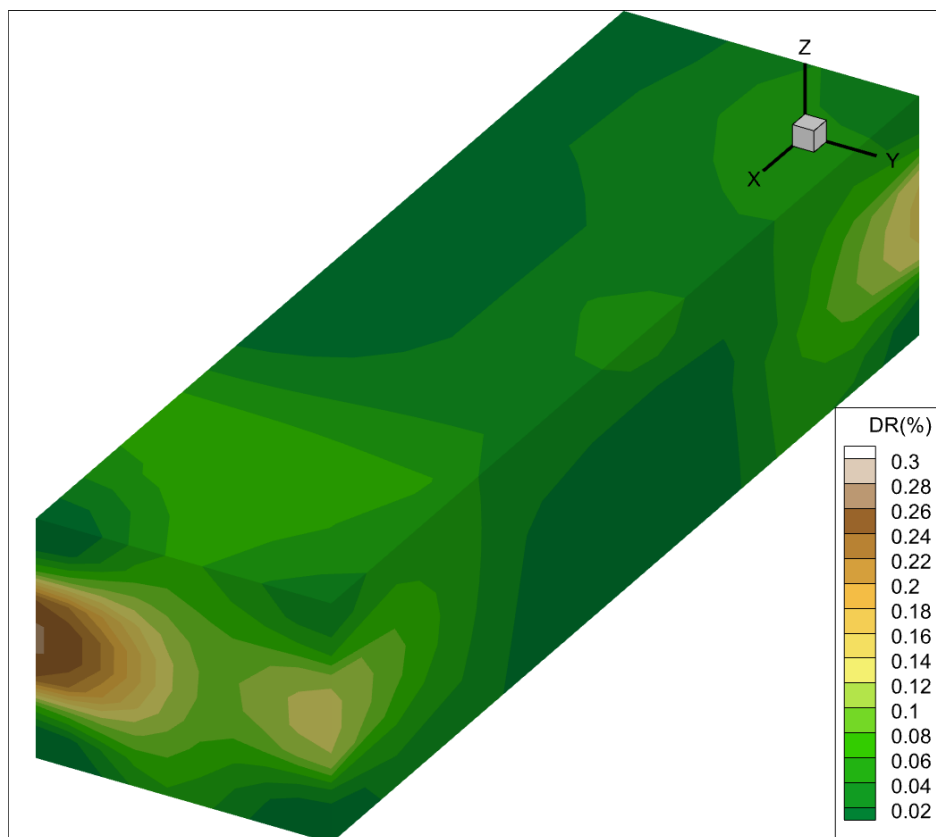


Figura 120.3D Draught Rate per i primi 6 punti di presa

Il Draught Rate ci mostra la percentuale di discomfort locale dovuto a correnti d'aria. Dal 3D in figura si nota che in generale i livelli di discomfort locale sono molto bassi in quanto la velocità dell'aria mossa dall'impianto di ventilazione è bassa perché l'impianto è posto nel controsoffitto e dunque non crea grandi correnti d'aria.

-Planimetrie

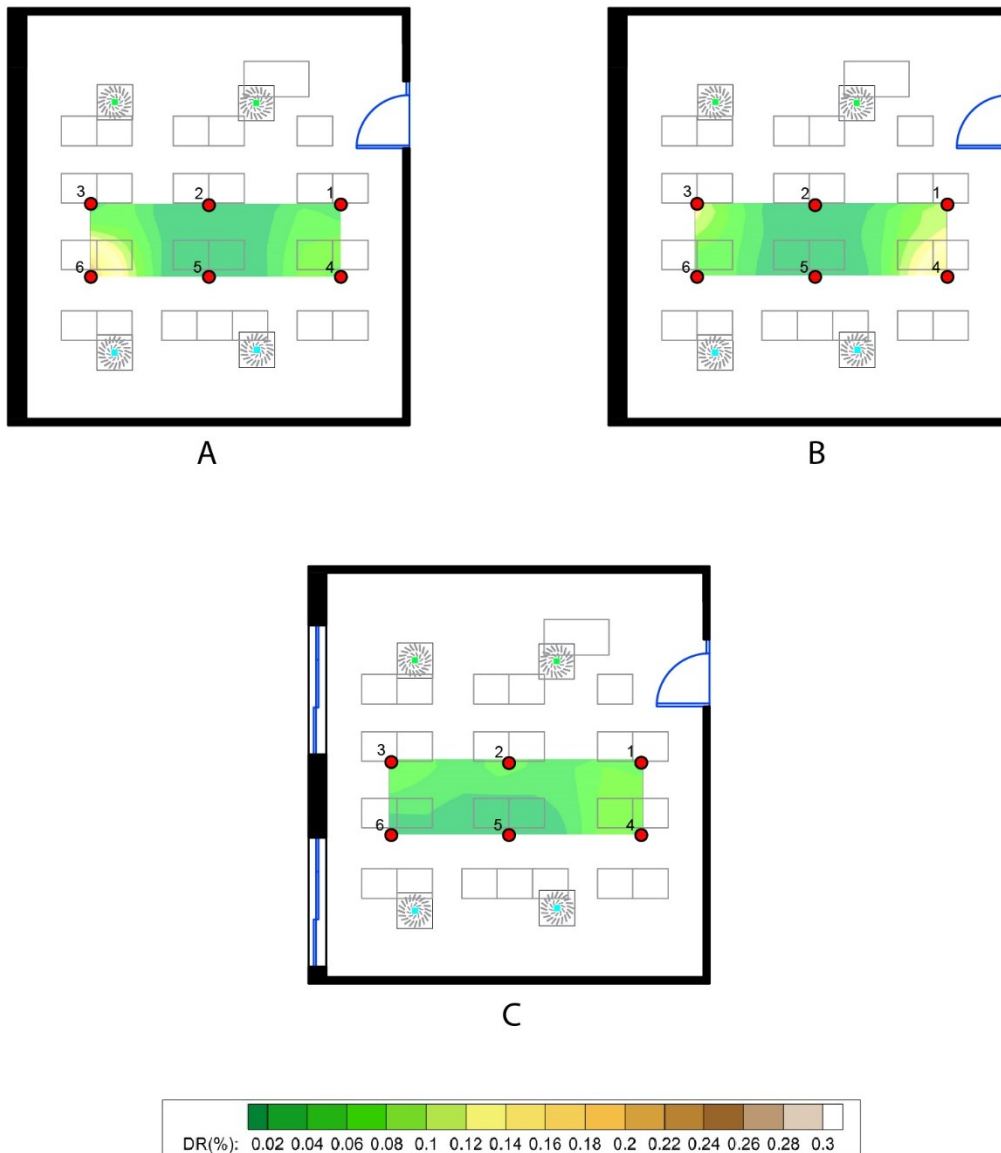


Figura 121. A planimetria a 0,10 m; B planimetria a 0,60 m; C planimetria a 1,1m

Dalle planimetrie in Figura 121 sono riportati i valori del Draught Rate alle 3 altezze di acquisizione delle misure. Si nota che a 10 cm da terra (A) si ha massimo discomfort locale nel punto 6, anche il punto 4 rileva un lieve discomfort rispetto ai punti centrali dell'aula (2 e 5) in cui invece la percentuale del draught rate è più bassa. A 60 cm (B) si nota un livello più alto di discomfort nel punto 4 e nel punto 3. L'area centrale dell'aula rimane inalterata rispetto a quella a 10 cm. A 110 cm (C) il discomfort locale, Draught Rate è più basso rispetto a quelli registrati agli altri due livelli.

-Sezioni parallele all'asse y

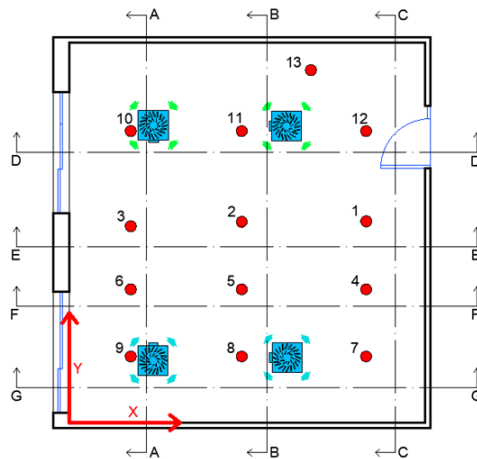


Figura 122. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: A-A; B-B; C-C

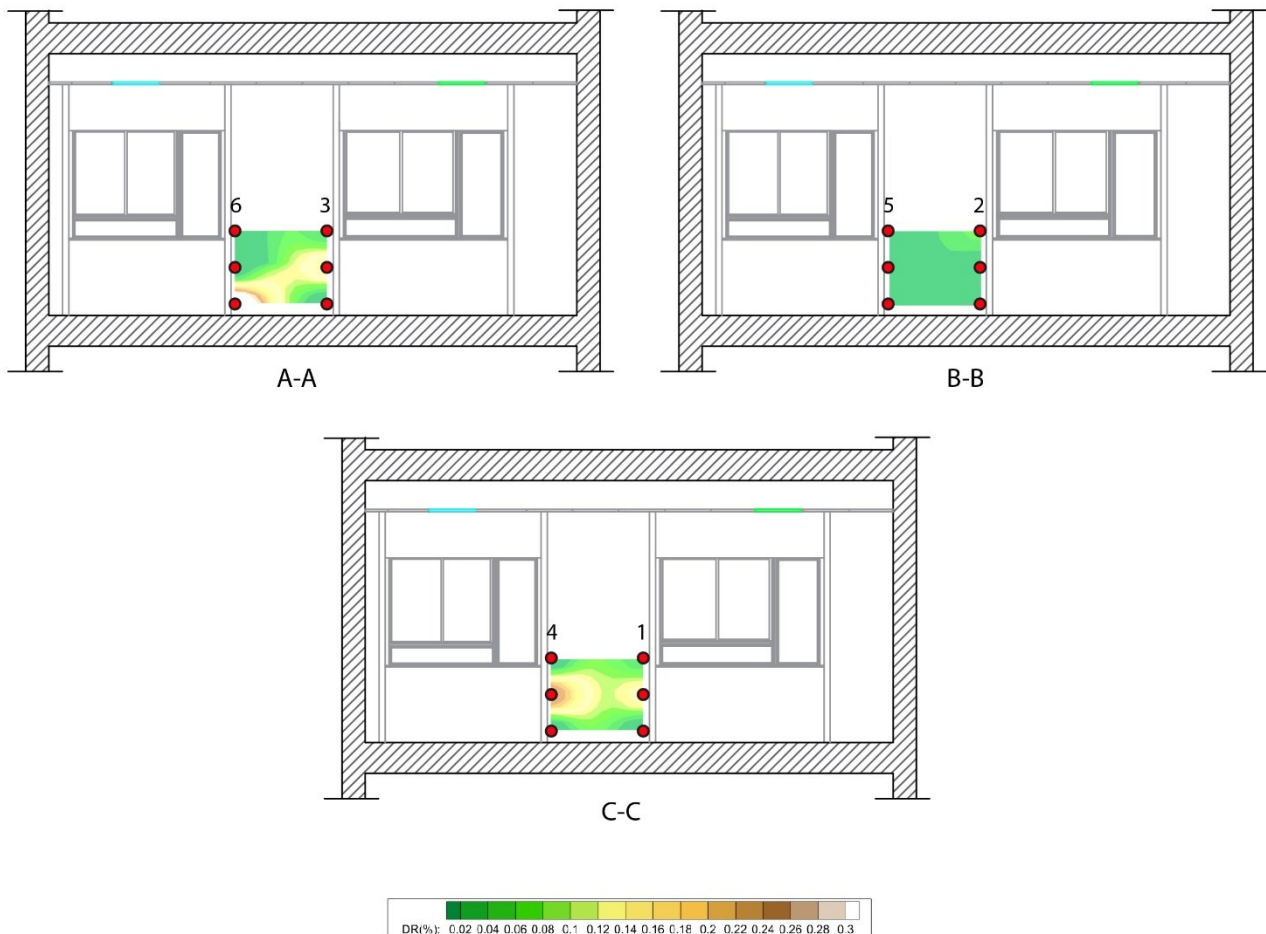


Figura 123. Sezioni parallele all'asse y con punti di presa

Per quanto riguarda il discomfort locale analizzato sulle sezioni parallele all'asse y, ovvero parallele alla parete finestrata (Figura 123), partendo dalla sezione A-A, il draught rate è massimo ad altezza 10 cm per il punto 6 e a 60 cm per il punto 3. Nella zona centrale (sezione B-B) dell'aula i valori del Draught Rate sono costanti, mentre la sezione C-C mostra un draught rate più evidente per entrambi

i punti a 60 cm. Il discomfort locale è dovuto all'impianto di ventilazione ma dai valori possiamo affermare essere un discomfort non troppo rilevante.

-Sezioni parallele all'asse x

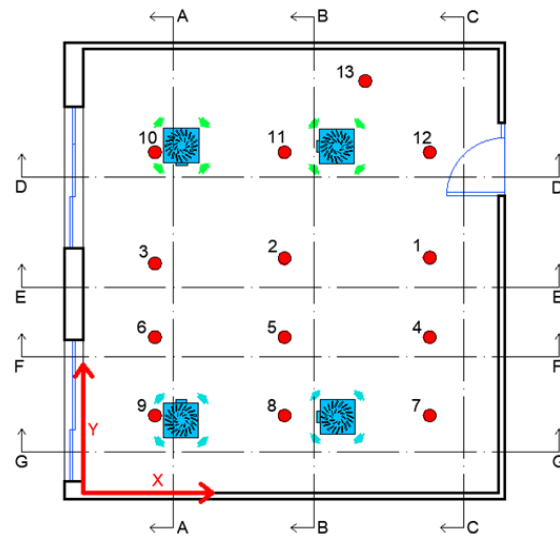


Figura 124. Planimetria con individuazione delle sezioni di riferimento: E-E; F-F

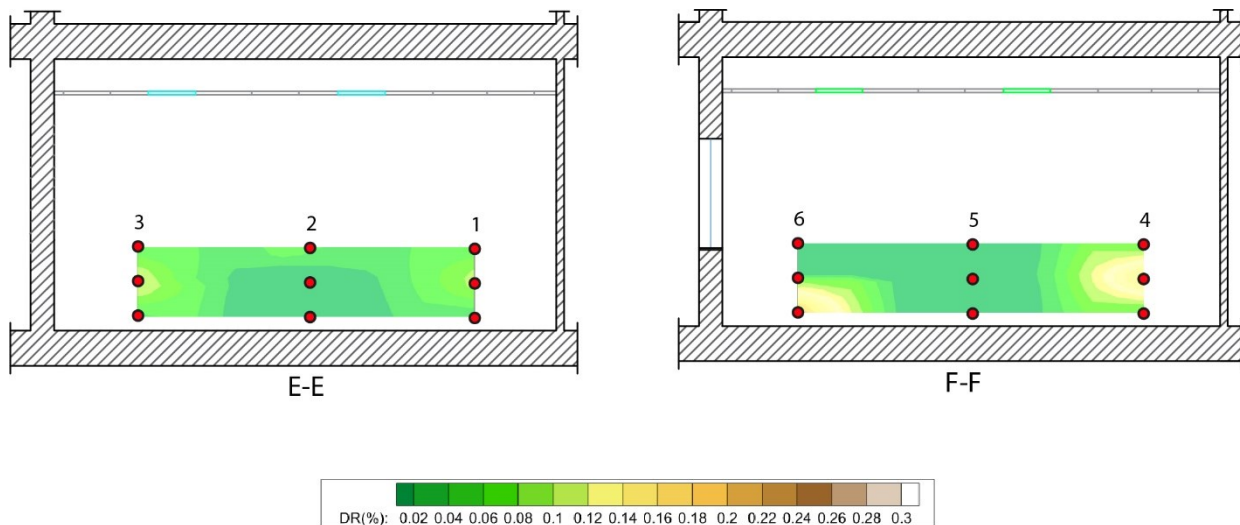


Figura 125. Sezioni parallele all'asse x con individuazione dei punti di presa

Le sezioni parallele all'asse x (Figura 125) mostrano che il draught rate è più evidente nei punti di presa delle zone sotto l'impianto di ventilazione (bocchette di mandata dell'aria) ovvero dove la velocità dell'impianto era più elevata; infatti, si registrano draught rate importanti nella sezione F-F nel punto 6 ad altezza 10 cm e nel punto 4 ad altezza 60 cm. Si può notare al paragrafo precedente una velocità dell'aria massima nella sezione F-F nelle stesse posizioni in cui si registra un Draught Rate massimo. La sezione E-E mostra un Draught Rate più basso nella zona centrale (punto 2) e un lieve discomfort nei punti di presa laterali più vicini all'impianto.

Temperatura Operativa

-Planimetria

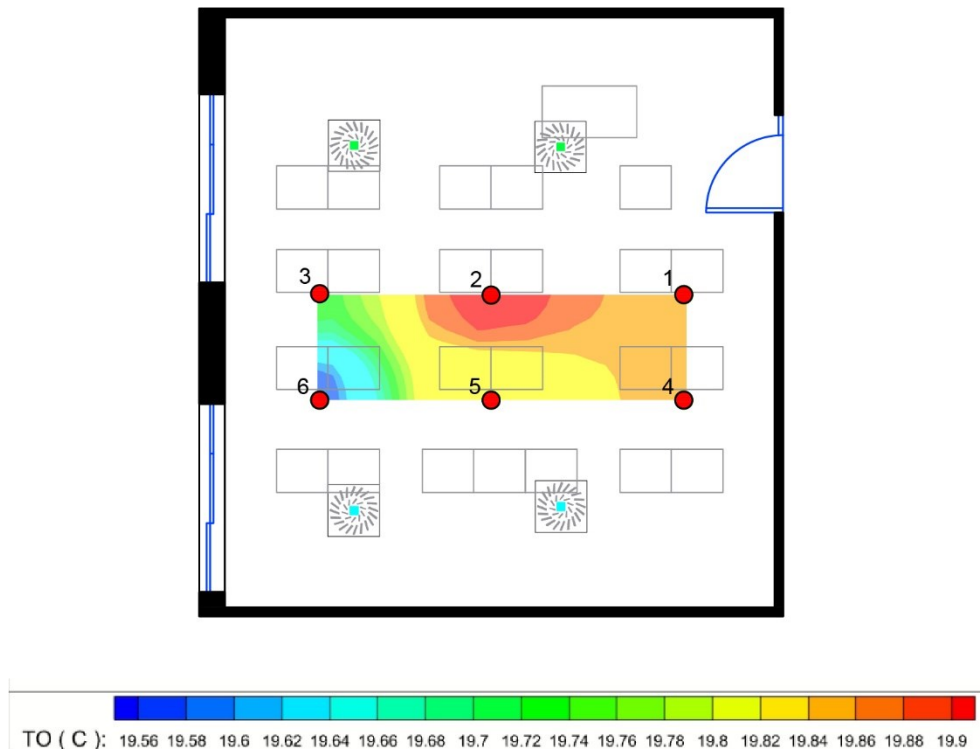


Figura 126. Planimetria della Temperatura Operativa su 6 punti di presa

La temperatura operativa registrata a 60 cm da terra (Figura 126) risulta essere massima con un valor di 19,9 °C nel punto 2, centrale all'aula, mentre il punto 6 risulta essere il più freddo a 19,56°C. Dal punto 2 andando verso la finestra la temperatura operativa diminuisce più velocemente che spostandosi dal punto 2 verso la parete opposta a quella dove si trovano le finestre. In generale la temperatura operativa tra i punti va da una scala di 19,55°C a 20°C dunque la variazione è molto piccola.

PMV e PPD
-Planimetria

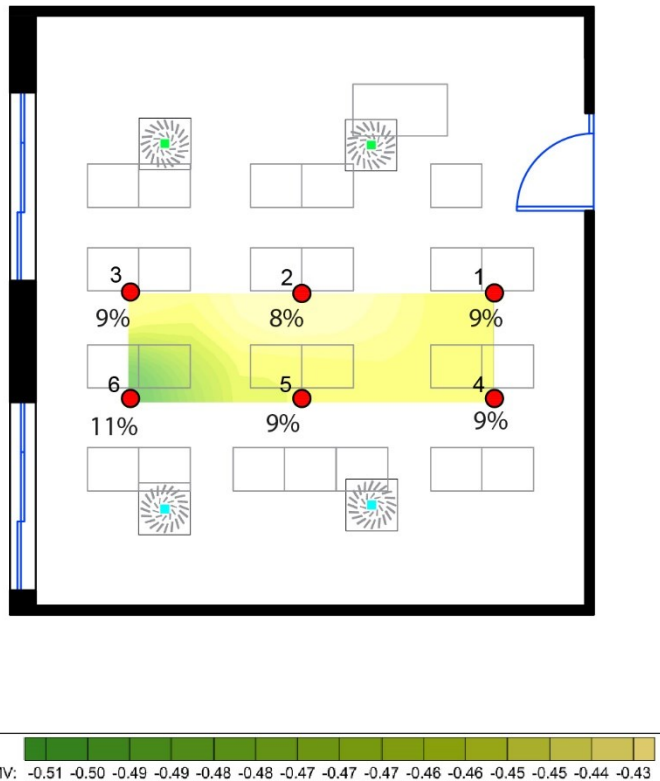


Figura 127. Planimetria del PMV per 6 punti di presa e indicazione del PPD per ogni punto

Per quanto riguarda PMV e PPD individuati nella stessa planimetria (Figura 127), si nota che dalla scala del PMV il voto medio degli utenti va tra -0,43 e -0,51, ciò vuol dire che siamo nella scala del PMV che indica un comfort termico tra né caldo e né freddo (neutro) e leggermente freddo. Essendo molto vicini alla neutralità dei voti relativi al PMV, le percentuali di insoddisfatti PPD sono molto basse. Il punto 6 è quello con PMV più basso pari a -0,51 e percentuale di insoddisfatti dell'11% (la più alta). I punti (1, 3, 4, 5) sono tutti a -0,45 per il PMV e 9% di percentuale di insoddisfatti. Il punto migliore dal punto di vista del comfort sembrerebbe essere quello centrale all'aula ovvero il 2 in cui si registra PMV del -0,43 e PPD dell'8%. Nella zona centrale dell'aula, infatti, per tutte le altezze e per tutti i dati valutati non si sono mai registrati valori che facessero pensare ad una situazione di discomfort.

4.3.4 Analisi del comfort

L'analisi esposta nel seguito è relativa a un confronto tra due strumenti di misura (Dantec e Manichino) che hanno effettuato misurazioni nella stessa posizione cioè quella relativa al punto 13 situata dietro alla cattedra dato che il Manichino rappresenta un uomo adulto ovvero l'insegnante. Le misurazioni sono state effettuate sia in condizioni di finestre aperte che chiuse, di seguito indicate rispettivamente con OW e CW (open window e closed window) e con impianto di ventilazione funzionante. Si precisa che la condizione a finestre chiuse sott'intende che anche la porta dell'aula fosse chiusa e che quando le finestre sono aperte la porta dell'aula è chiusa. Le misurazioni sul punto 13 sono state effettuate nel mese di luglio per Falconara e giugno per Recanati.

E' importante precisare che il manichino acquisisce dati ogni 30 secondi mentre la Dantec ogni 5 secondi ed entrambi gli strumenti sono hanno misurato valori per un periodo di 10 minuti.

Dalla Dantec, sia a finestre aperte OW che a finestre chiuse CW, sono stati ricavati dati relativi a temperatura e velocità entrambe alle 3 altezze di 10 cm, 60 cm e 110 cm che individuano 3 porzioni del corpo di un utente seduto: caviglie, anche e capo. In oltre la Dantec misura anche il PMV e il PPD così come il manichino ed è per questo che è stato possibile effettuare un confronto. Dai dati acquisiti per ogni intervallo di tempo sono state ricavate medie e deviazioni standard.

Falconara

PMV E PPD

I dati sono stati divisi per finestre aperte e chiuse rispettivamente per PMV e PPD registrati sia dalla Dantec che dal manichino. Si registra una condizione di discomfort leggermente caldo con i dati della Dantec e discomfort caldo con quelli del manichino. Inoltre, a finestre aperte, i dati sono di poco inferiori rispetto a quelli a finestre chiuse ma comunque ricadono nel range del discomfort caldo. (Figura 128)

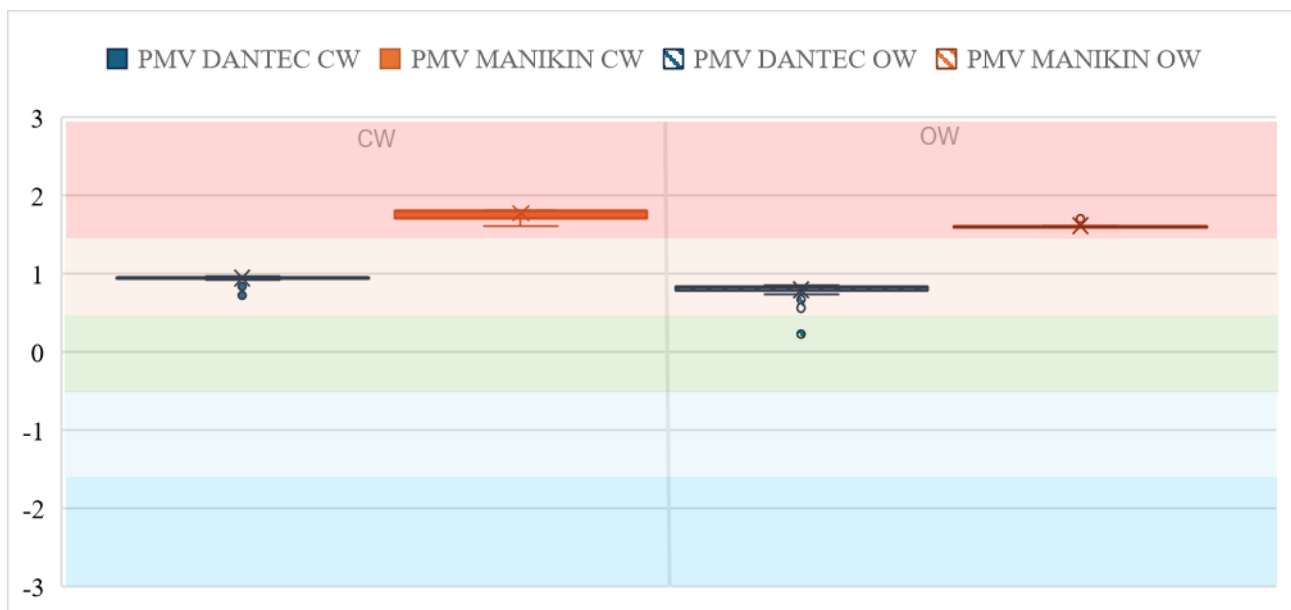


Figura 128_Grafici box plot dei dati PMV acquisiti con la Dantec e con il Manichino sia in condizioni di finestre aperte (OW) che in condizioni di finestre chiuse (CW) per la scuola di Falconara

Il PPD invece ci illustra che con la Dantec il livello di percentuale di insoddisfatti è minore rispetto che con il manichino, il quale invece registra una percentuale maggiore. Aprendo le finestre sia il manichino che la dantec registrano una percentuale di insoddisfatti leggermente minore rispetto al caso con finestre chiuse, questo ci dimostra che la ventilazione naturale migliora il PPD e di conseguenza il PMV. A finestre chiuse la percentuale media di insoddisfatti è del 24% con la Dantec e 65% con il manichino. A finestre aperte il PPD medio è 18% con la Dantec e 57% con il manichino. (Figura 129) Questa analisi ci mostra anche la divergenza tra i due strumenti di acquisizione che nonostante si trovano nella stessa posizione e alle stesse condizioni registrano valori molto diversi.



Figura 129_Grafici box plot dei dati PPD acquisiti con la Dantec e con il Manichino sia in condizioni di finestre aperte (OW) che in condizioni di finestre chiuse (CW) per la scuola di Falconara

TEMPERATURA E VELOCITA' DELL'ARIA

Per la temperatura e la velocità dell'aria sono disponibili dati ricavati dalla Dantec alle 3 altezze di acquisizione e in condizioni di finestre aperte e chiuse. Per la temperatura (Figura 130) ciò che si nota è che dal livello a 10 cm a quello a 110 cm la temperatura aumenta sia a finestre aperte che a finestre chiuse, inoltre, a finestre aperte in generale si registrano temperature minori che a finestre chiuse e ciò è dovuto alla ventilazione naturale.

A finestre chiuse a 10 cm la temperatura media dell'aria è di 27,4°C circa, a 60 cm è di 28,1°C e a 110 cm è di 28,55°C circa. Il gradiente tra piedi e capo risulta di circa 1 grado.

A finestre aperte a 10 cm la temperatura media dell'aria è di 27,1°C, a 60 cm è di 27,6°C e a 110 cm è di 28°C, anche in questa condizione il gradiente verticale è di 1 grado circa.

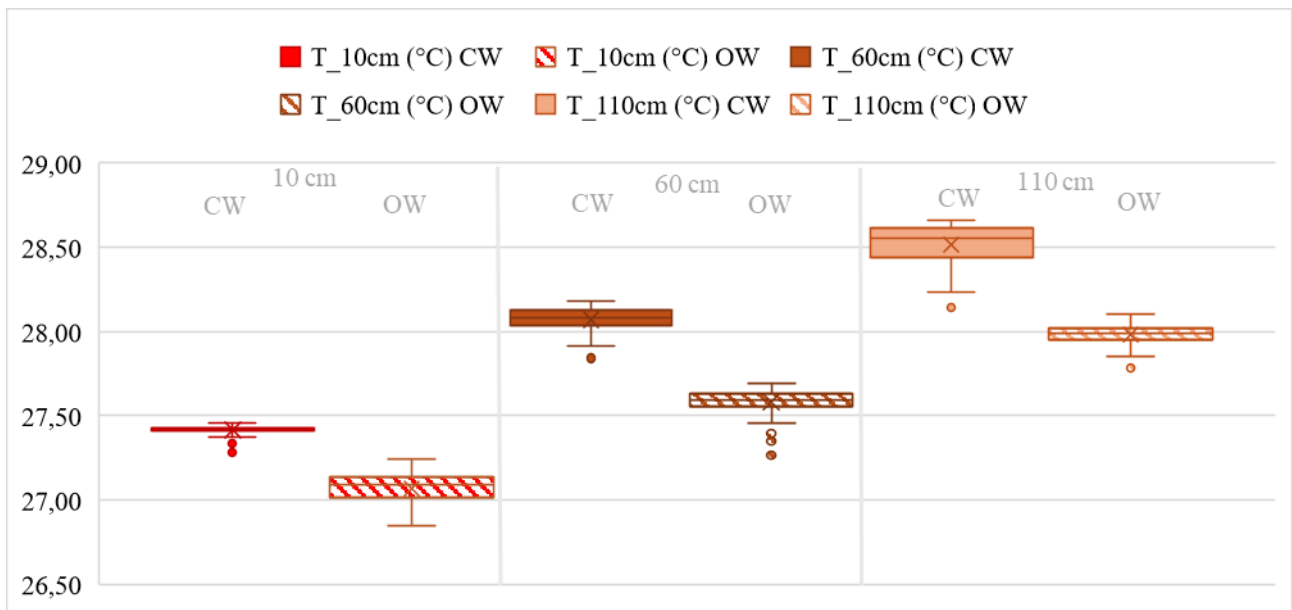


Figura 130_Grafici box plot della temperatura alle 3 altezze acquisita con la Dantec posizionata al punto 13 nell'aula a Falconara

La velocità dell'aria (Figura 131) rimane pressoché costante a finestre chiuse intorno a 0,04 m/s, mentre subisce un lieve aumento a finestre aperte e aumentando l'altezza di acquisizione, infatti, si registra 0,05 m/s a 10 cm, 0,06 m/s a 60 cm e 0,09 m/s a 110 cm. Non sono registrati quindi valori importanti di velocità dell'aria sulla posizione 13, cioè dietro la cattedra dell'insegnante.

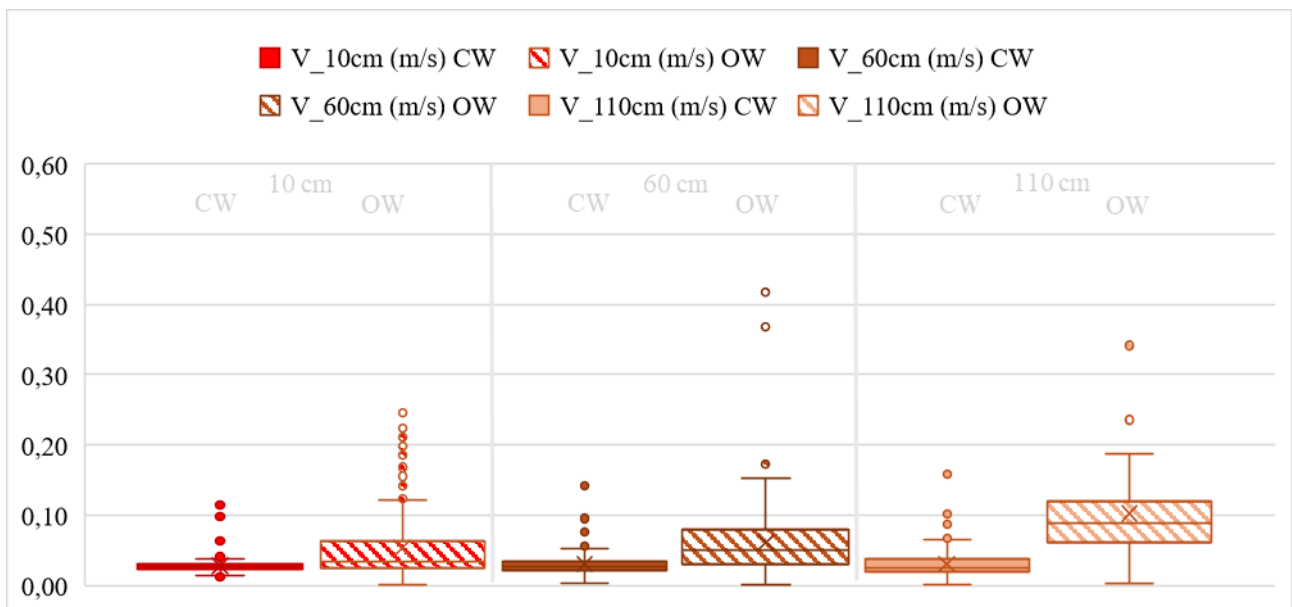


Figura 131_Grafici box plot della velocità dell'aria alle 3 altezze acquisita con la Dantec posizionata al punto 13 nell'aula a Falconara

RIELABORAZIONE DATI MANICHINO

Di seguito è stato riportato un grafico (Figura 132) che illustra l'andamento della temperatura equivalente delle 27 parti del corpo del manichino suddivise nelle 3 zone in modo da poter ricondurre le successive valutazioni ai dati registrati con la Dantec alle 3 altezze di presa (10 cm; 60 cm; 110cm). Si riportano i dati relativi sia al caso dell'aula con tutte le finestre chiuse che con le finestre aperte. È possibile notare che tutte le zone del manichino a finestre chiuse hanno temperatura equivalente minore rispetto alla condizione di finestre aperte, infatti, si sottolinea che anche le temperature registrate con la Dantec alle 3 altezze sono di poco maggiori a finestre chiuse che a finestre aperte. In oltre le zone del manichino a 10 cm risultano avere una temperatura minore rispetto quelle a 60 cm e 110 cm. La zona del bacino invece ha un picco di temperatura che sfiora i 34 °C mentre le cosce sembrano avere un valore stabile a 31,5°C circa questo probabilmente è dovuto al fatto che il manichino è seduto con le gambe sotto la cattedra e la cattedra ha delle pareti in legno che schermano le radiazioni solari ed eventuali correnti d'aria.

A 60 cm le mani e gli avambracci sono più freddi rispetto all'addome e alla parte bassa della schiena nonostante siano disposte in altezza alla stessa quota, questo è dovuto al fatto che avambraccio e mano sono scoperti dagli indumenti in quanto il manichino indossa una t-shirt a manica corta mentre schiena e addome sono coperti.

Va detto che le misure della temperatura equivalente sono anche influenzate dal contatto con la sedia che ha uno schienale e una seduta in legno, infatti, le parti a contatto con essa hanno la stessa temperatura (Back thigh e Backside). A 110 cm, la temperatura si mantiene a circa 31,5 °C ma si notano le parti "petto destro" e "schiena alta" avere una temperatura di mezzo grado inferiore. Il viso e il cranio essendo scoperti da indumenti hanno una temperatura equivalente costante e più bassa rispetto alle altre zone del corpo tra i 28,3°C e 28,9°C, si ipotizza che questo abbassamento di temperatura equivalente sia anche dovuto al fatto che viene registrata una velocità dell'aria pari a 0,102 m/s a 110 cm da terra nella postazione di acquisizione 13 attraverso la Dantec, nelle condizioni a finestre aperte.

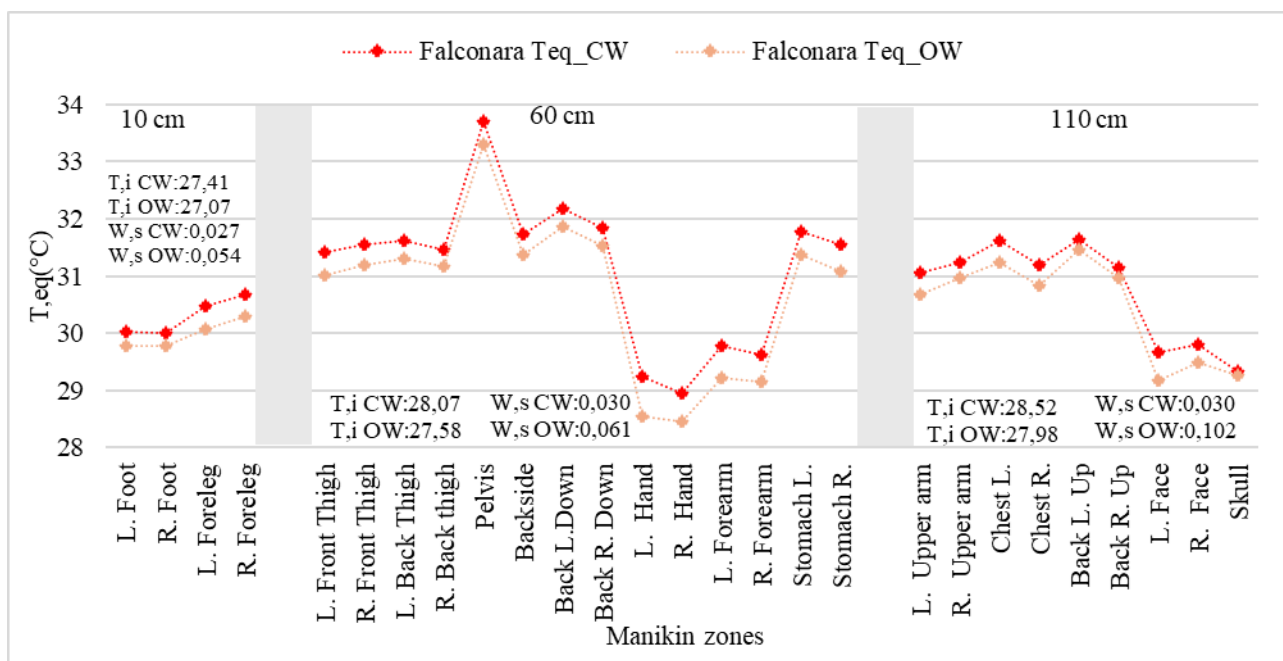


Figura 132_Grafico dell'andamento della temperatura equivalente di tutte le zone del Manichino nella scuola di Falconara

Recanati

PMV E PPD

Il PMV (Figura 133) viene valutato nelle due condizioni a finestre aperte e a finestre chiuse e si nota, per la scuola di Recanati, che hanno all'incirca gli stessi valori. Valutando la differenza tra la media dei dati acquisiti con i due strumenti di misura, cioè la Dantec e il manichino, si nota che il livello del comfort ricade per entrambi gli strumenti nella zona calda del grafico (leggermente caldo per la Dantec e molto caldo per il manichino). Quando le finestre sono aperte il manichino registra un valore medio di PMV più elevato rispetto che a finestre chiuse mentre per la Dantec è il contrario cioè il valore minimo si ha a finestre aperte. Anche in questo caso, come per la scuola di Falconara, la differenza tra i due strumenti di misura è abbastanza evidente, infatti, la Dantec sottostima il PMV.

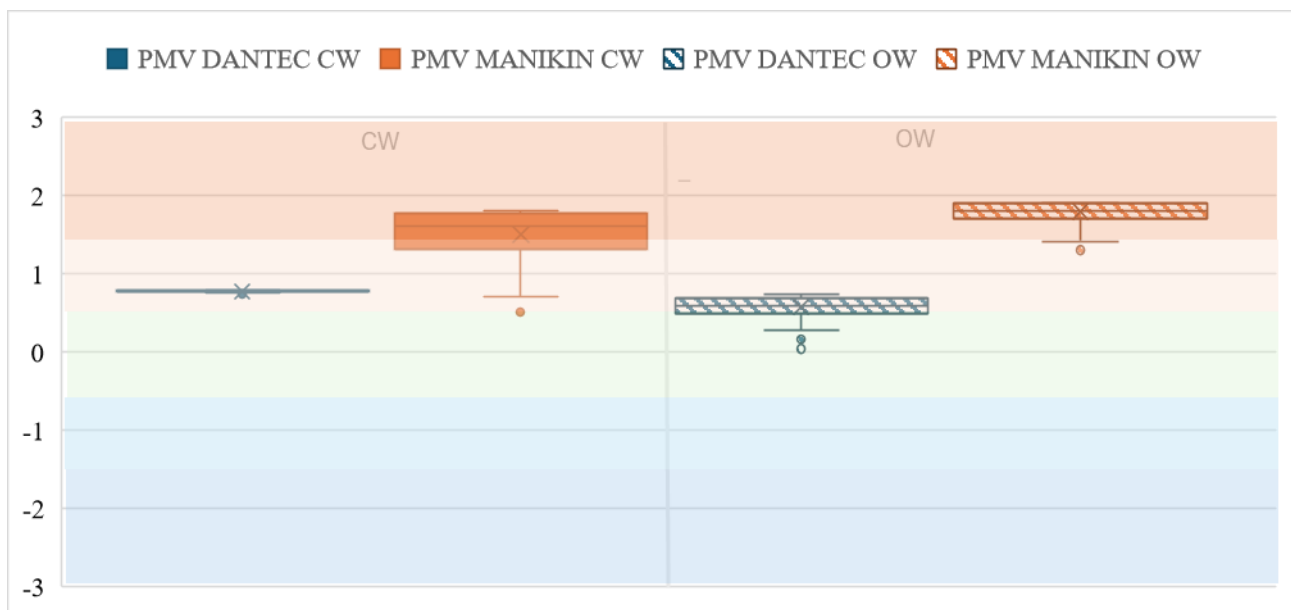


Figura 133_Grafici box plot dei dati PMV acquisiti con la Dantec e con il Manichino sia in condizioni di finestre aperte (OW) che in condizioni di finestre chiuse (CW) per la scuola di Recanati

La percentuale di insoddisfatti PPD (Figura 134) registrata dalla Dantec è in generale, sia per finestre aperte che per finestre chiuse, più bassa rispetto a quella registrata con il manichino segno del fatto che i due strumenti di misura non hanno la stessa precisione per l'acquisizione di dati, infatti, la Dantec sottostima i livelli dei dati. Nello specifico la Dantec registra un PPD del 18% a finestre chiuse e del 12% a finestre aperte, il Manichino registra un PPD più elevato con un valore medio del 53% quando le finestre sono chiuse e una percentuale di insoddisfatti media del 66% a finestre aperte. Da questi dati si può notare sia la differenza nei valori registrati tra i due strumenti di acquisizione ma anche la differenza tra dati registrati con lo stesso strumento nelle due condizioni a finestre aperte e chiuse, infatti, la differenza registrata tra i valori medi acquisiti dalla Dantec a finestre chiuse ed aperte è del 5% mentre quella con il manichino è del 13%.

Distinguendo le due casistiche ovvero aula con finestre aperte e chiuse, a finestre chiuse la percentuale di insoddisfatti registrata con il manichino è minore rispetto che a finestre aperte quindi gli utenti sono maggiormente insoddisfatti del livello del comfort quando le finestre sono aperte.

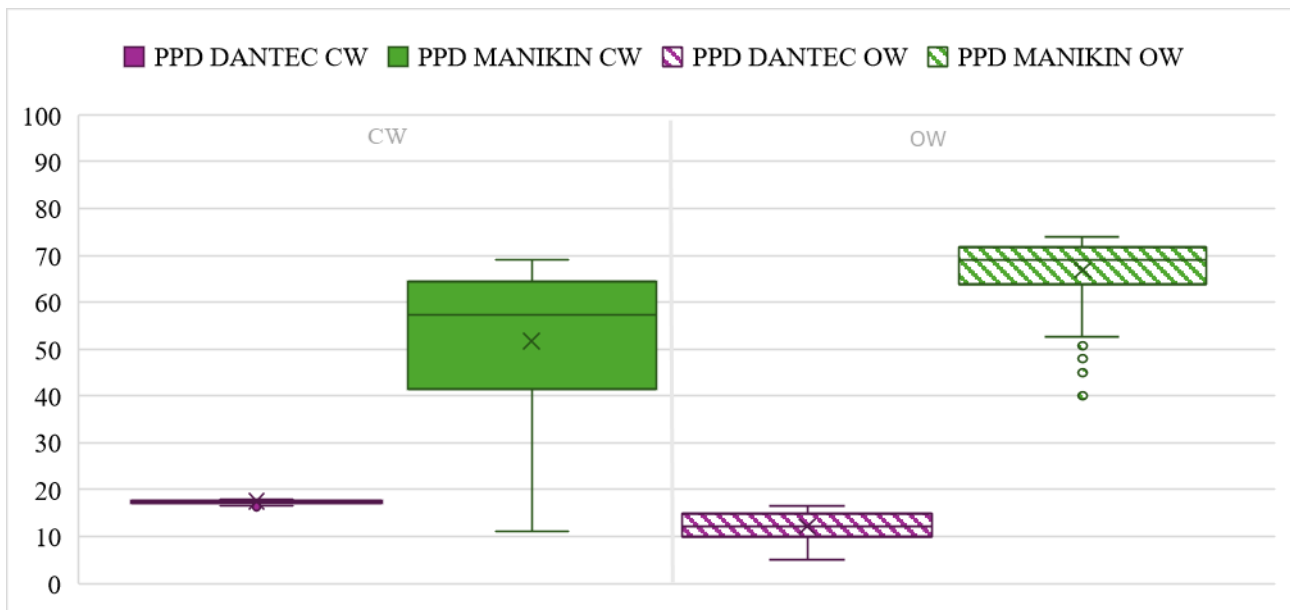


Figura 134_Grafici box plot dei dati PPD acquisiti con la Dantec e con il Manichino sia in condizioni di finestre aperte (OW) che in condizioni di finestre chiuse (CW) per la scuola di Recanati

TEMPERATURA E VELOCITA' DELL'ARIA

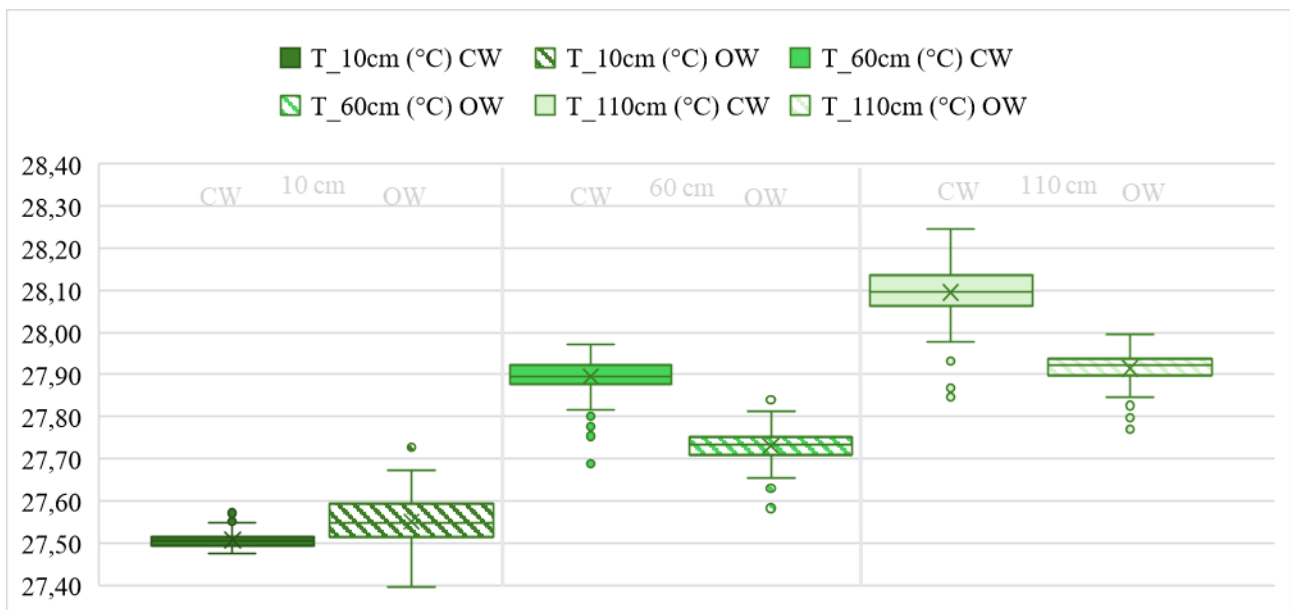


Figura 135_Grafici box plot della temperatura alle 3 altezze acquisita con la Dantec posizionata al punto 13 nell'aula a Recanati

La temperatura registrata con la Dantec (Figura 135) nello stesso punto dove è stato posizionato il manichino, registra dati su 3 punti di presa: 10cm, 60 cm, 110 cm. Ciò che si nota dal grafico box-plot è che a finestre chiuse (CW) la temperatura media dell'aria a 10 cm è di 27,50°C. A 60 cm è di 27,90°C mentre a 110 cm è di 28,10°C. A finestre aperte (OW) a 10 cm la temperatura media dell'aria è di 27,55°C, a 60 cm è di 27,73°C mentre a 110 cm è di 27,92°C. È evidente che a 10 cm ovvero ad altezza caviglie dell'utente, a finestre aperte la temperatura è maggiore probabilmente perché essendo la portafinestra aperta e non distante dalla Dantec ha influenzato sulla temperatura. A 60 cm e 110 cm invece la tendenza si inverte, cioè, la temperatura è maggiore a finestre chiuse che a finestre aperte.

È anche visibile come gli andamenti della temperatura siano crescenti andando dal basso verso l'alto sia a finestre aperte che a finestre chiuse.

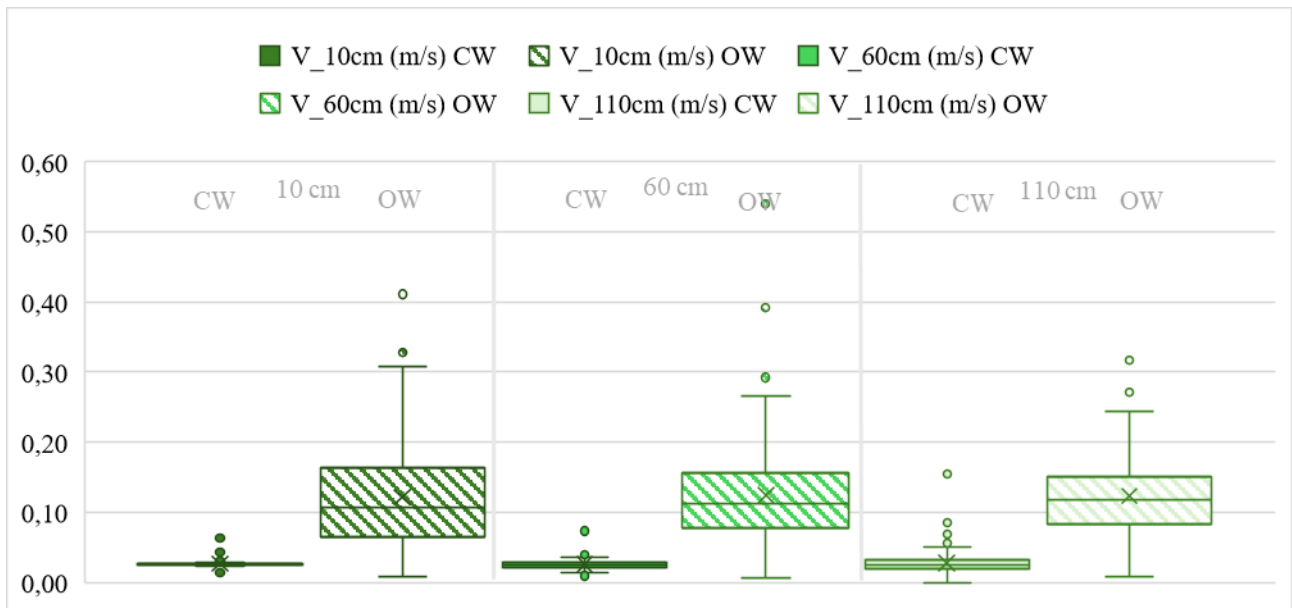


Figura 136_Grafici box plot della velocità dell'aria alle 3 altezze acquisita con la Dantec posizionata al punto 13 nell'aula a Recanati

La velocità dell'aria registrata con la Dantec al punto di presa 13 nelle due condizioni di finestre aperte e chiuse (Figura 136) ci dimostra che a finestre chiuse la velocità media dell'aria è sempre costante a circa 0,03 m/s per le 3 altezze, anche a finestre aperte la velocità dell'aria è costante per le 3 altezze ma ha un valore medio maggiore pari a circa 0,12 m/s. La percentuale di insoddisfatti PPD, a finestre chiuse, probabilmente non è dovuta alla velocità dell'aria che si mantiene bassa mentre a finestre aperte sì.

RIELABORAZIONE DATI MANICHINO

Di seguito è riportato il grafico (Figura 137) che illustra la media, sui 10 minuti, dei dati acquisiti dalle 27 parti del corpo del manichino e suddivise in 3 zone (10 cm, 60 cm e 110 cm). Si nota che per tutte le parti, quando le finestre sono aperte nell'aula, la temperatura equivalente registrata è maggiore mentre a finestre chiuse la temperatura scende. Il discostamento della temperatura equivalente per alcune zone del corpo è anche maggiore di 1 grado. La temperatura più alta quando le finestre sono aperte si registra nella zona del bacino con 33,4°C, probabilmente perché è una zona coperta dagli indumenti, mentre a finestre chiuse la gamba sinistra è quella che registra una temperatura di 31,9°C. Si notano differenze tra le zone del corpo suddivise tra destra e sinistra ovvero le tibie e le cosce (davanti e dietro) e il viso e questo è dovuto all'influenza della radiazione solare e delle correnti d'aria dovute alla ventilazione.

Inoltre, è evidente come dal bacino fino alla zona dello stomaco e in generale il busto dell'utente, tutte le zone abbiano circa la stessa temperatura, per quanto riguarda invece tutte le zone a 110 cm si notano temperature equivalenti decrescenti a partire dalle braccia, dove si registra una temperatura tra i 30,5°C e i 31,5°C fino al cranio dove si registrano 29°C.

La temperatura registrata dalla Dantec aumenta di circa 0,4°C dal basso verso l'alto e tra finestre aperte e chiuse la temperatura è circa la stessa, ciò che varia è la velocità dell'aria che seppur si mantiene costante alle 3 altezze è molto variabile tra le due condizioni a finestre aperte e chiuse (0,03 m/s e 0,12 m/s rispettivamente a finestre chiuse e aperte).

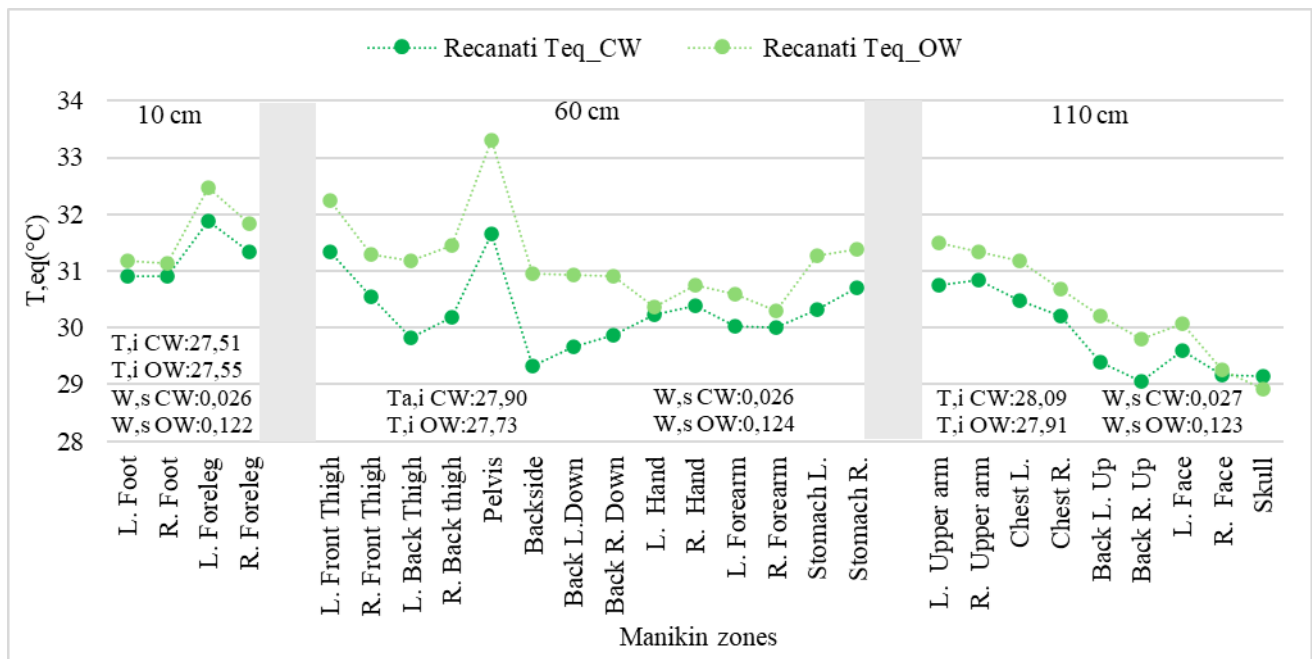


Figura 137_Grafico dell'andamento della temperatura equivalente di tutte le zone del Manichino nella scuola di Recanati

5 Discussione

Nel presente elaborato è stata effettuata un'approfondita analisi tipologica sulle scuole della Regione Marche con lo scopo di identificare gli archetipi delle aule. Successivamente, dopo aver selezionato due aule di due scuole del campione che differiscono per la tipologia di ventilazione meccanica: Falconara con impianto delocalizzato con unità di ventilazione interna alle aule (D) e Recanati con impianto delocalizzato con unità e canali interni all'aula (DI), è stata effettuata un'analisi comparativa sperimentale riguardante il comfort termico e la qualità dell'aria in funzione alle diverse macchine di ventilazione.

L'analisi tipologica delle scuole Marchigiane ha permesso di:

- 1- Classificare le scuole in funzione delle tipologie di impianto di ventilazione meccanica controllata VMC ed è risultato che il 94% di scuole ha impianto delocalizzato con unità di ventilazione interna alle aule (D), il 3% di scuole ha impianto delocalizzato con unità e canali interni all'aula (DI), il 2% di scuole ha impianto delocalizzato con unità esterne all'aula (DE) e l'1% di scuole ha impianto centralizzato (C).

In letteratura, fino ad ora, uno studio ha riportato una clusterizzazione di un campione di più di 1000 edifici scolastici che sono stati raggruppati non in funzione del tipo di VMC ma in base a due predittori: anno di costruzione e rapporto superficie/volume al fine di valutare le prestazioni energetiche [65].

- 2- Individuare archetipi di aula, ognuno dei quali caratterizzato da differenti percentuali finestrate. Il 37% delle aule sono ampie con il 40% di area finestrata, il 51% delle aule sono quadrate con il 30% di area finestrata, il 12% delle aule sono profonde con il 40% di area finestrata.

Studi recenti hanno considerato archetipi relativi l'intero edificio in un'ottica di efficientamento energetico globale [11] [12] oppure edifici non scolastici ma residenziali [22], ma non sono mai state considerate le aule.

La percentuale finestrata invece è stata presa in considerazione in uno studio condotto da Mamdooh Alwetaishi, il quale considera scuole situate in località diverse dell'Arabia Saudita e quindi con condizioni climatiche differenti, l'esposizione delle aule, la percentuale finestrata e l'influenza che quest'ultima ha sulla posizione degli studenti nell'aula. Lo studio rivela che l'esposizione delle aule a sud ed est sono le peggiori in termini di comfort termico in tutte le località ed il rapporto superficie vetrata/parete è raccomandato al 10% in entrambe le condizioni climatiche di caldo e secco e caldo e umido.[66]

Al termine dell'analisi tipologica sulle scuole della Regione Marche dotate di VMC, è stata effettuata un'analisi comparativa sperimentale su due aule: una della scuola di Falconara e una della scuola di Recanati. I due ambienti, caratterizzati dallo stesso archetipo di aula quadrata (che risulta più frequente) e dimensioni e numero di occupanti simili, differiscono per la tipologia di ventilazione meccanica, infatti, Falconara ha un impianto delocalizzato con unità di ventilazione interna alle aule (D) mentre Recanati ha un impianto delocalizzato con unità e canali interni all'aula (DI) e per la percentuale finestrata.

Prima d'ora in uno studio condotto da Sara Bjerre Sørensen confrontando aule dotate di ventilazione meccanica e aule ventilate in modo naturale, si è dimostrato che le aule ventilate meccanicamente riportano livelli di CO₂ minori rispetto a quelle ventilate in modo naturale, inoltre tutte le aule hanno

registrato emissioni di CO₂ al di sopra dei livelli raccomandati di 1000 ppm per più del 50% delle ore scolastiche [48]. Quest'ultimo risultato è stato ottenuto anche dalla presente ricerca, infatti da uno studio settimanale dell'anidride carbonica, l'aula di Falconara (dotata di impianto di tipologia D) ha registrato per due giorni valori di CO₂ più elevati dell'8% rispetto al limite dettato dall'OMS (1000 ppm). Mentre a Recanati (DI) il limite non viene mai superato.

Effettuando per entrambe le aule una mappatura 3D del comfort in condizioni stazionarie (porta e finestre chiuse e velocità costante dell'impianto) nel periodo di maggio si è evidenziato che:

1. Le temperature dell'aria sono più alte in corrispondenza dei banchi vicini alle finestre a causa della radiazione solare entrante e dello scambio termico attraverso l'infisso (alta trasmittanza termica), lo stesso risultato è stato ottenuto da Mamdooh Alwetaishi per le tre tipologie di aule che ha analizzato caratterizzate però non da diversi sistemi di ventilazione ma da diverse tipologie climatiche[66]. Il gradiente orizzontale medio (temperatura dell'aria del punto più vicino alla finestra meno temperatura dell'aria del punto più distante dalla finestra) risulta essere del 44% maggiore per Falconara rispetto che Recanati.
2. Per l'aula di Falconara si evidenziano valori di velocità dell'aria massimi pari a 0.68 m/s in corrispondenza della zona antistante alla macchina di tipologia D. Per Recanati invece, dove è presente la macchina di tipologia DI, il valore massimo risulta essere di 0.04 m/s in corrispondenza di una delle bocchette di ripresa dell'aria.
3. L'indice di discomfort locale DR, per l'aula di Falconara ha un valore massimo pari all'85% in corrispondenza della zona antistante alla macchina di tipologia D, coerentemente con quanto affermato al punto precedente, mentre a Recanati il valore massimo è pari allo 0,32% in corrispondenza di una delle bocchette di mandata dell'aria.
4. L'indice di discomfort globale PMV evidenzia una percezione dell'ambiente tra leggermente freddo e freddo (PMV tra -0,95 e -1,48), con una percentuale di insoddisfatti PPD tra il 10% e il 50,16% a Falconara mentre l'ambiente risulta essere tra neutro e leggermente freddo (PMV tra -0,43 e -0,51), con una percentuale di insoddisfatti PPD tra l'8,86% e il 10,53% a Recanati. Nello specifico la zona in cui si registra un PMV di -1,48 con una percentuale di insoddisfatti PPD del 50,16% è quello in corrispondenza della zona antistante alla macchina di tipologia D nell'aula a Falconara, la stessa zona dove si registra una velocità dell'aria di 0,68 m/s.

Riassumendo, a Falconara si evidenzia che la zona antistante l'impianto registra velocità dell'aria e draught rate elevati, un PMV tendente al freddo e una percentuale di insoddisfatti fino al 50,16% come è possibile notare dalla Figura 138.

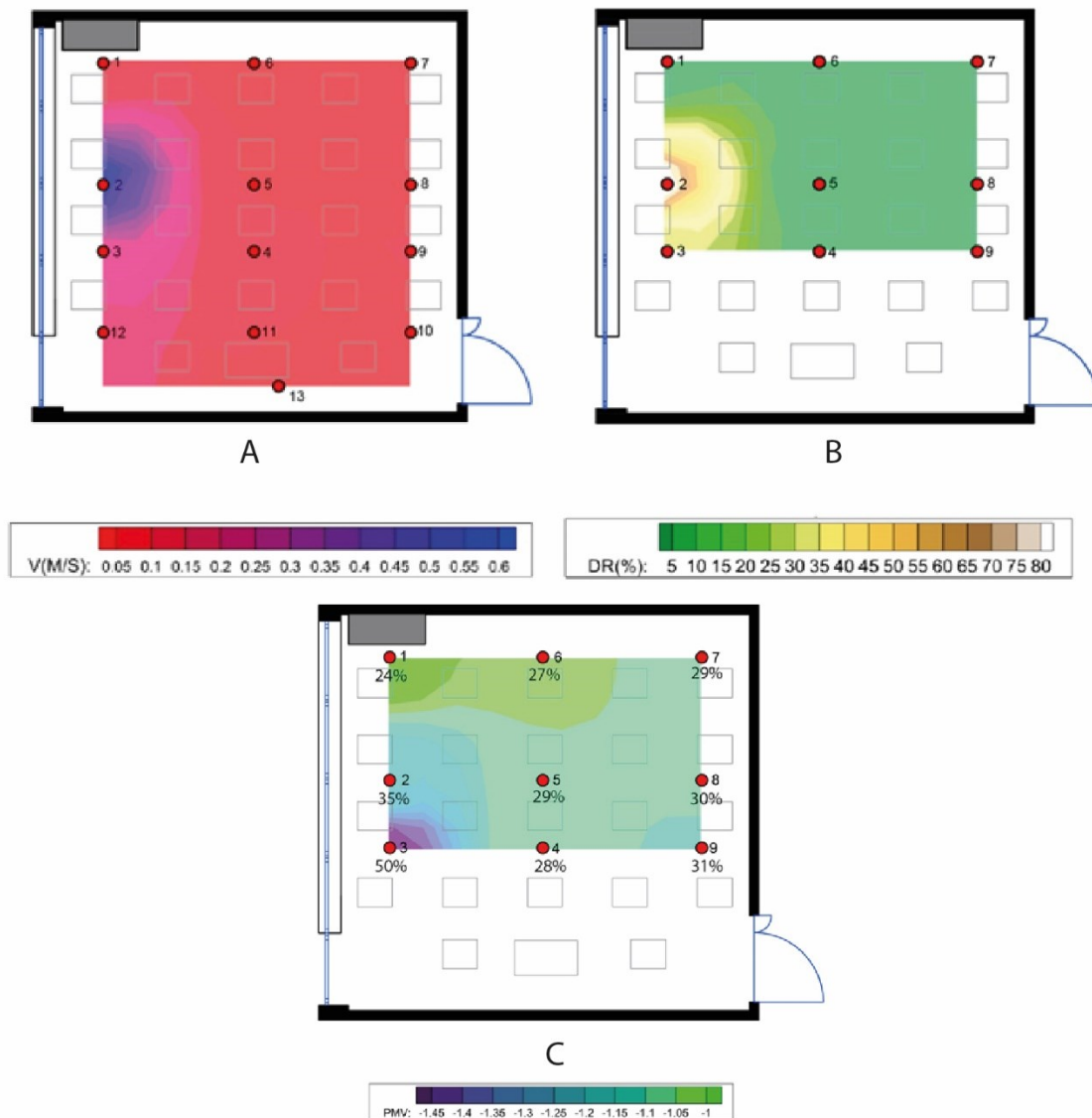


Figura 138_Velocità dell'aria, Draught rate, PMV e PPD nell'aula di Falconara

Effettuando per entrambe le aule una valutazione del comfort termico estivo (giugno-luglio) attraverso un Manichino termico adulto a 27 zone differenziate si è evidenziato che nella zona della cattedra l'insegnante percepisce una condizione termica equivalente ad:

1. un PMV medio pari a 1,8 (caldo) e PPD medio di 65% e un PMV medio di 1,5 (caldo) e PPD medio del 52% rispettivamente per Falconara e Recanati in condizione di finestre e porta chiuse.
2. un PMV medio pari a 1,6 (caldo) e PPD medio di 58% e un PMV medio di 1,8 (caldo) e PPD medio del 67% rispettivamente per Falconara e Recanati in condizione di finestre aperte e porta chiusa.

Il PMV, valutato in entrambe le aule dal manichino sia in condizioni di finestre aperte che chiuse, indica sempre discomfort caldo però a finestre chiuse, si nota che nell'aula di Recanati, il PMV medio è il più basso pari a circa 1,5. Di conseguenza il livello medio di insoddisfatti PPD è minore nell'aula di Recanati a finestre chiuse, pari al 52%. (Figura 139 e Figura 140)

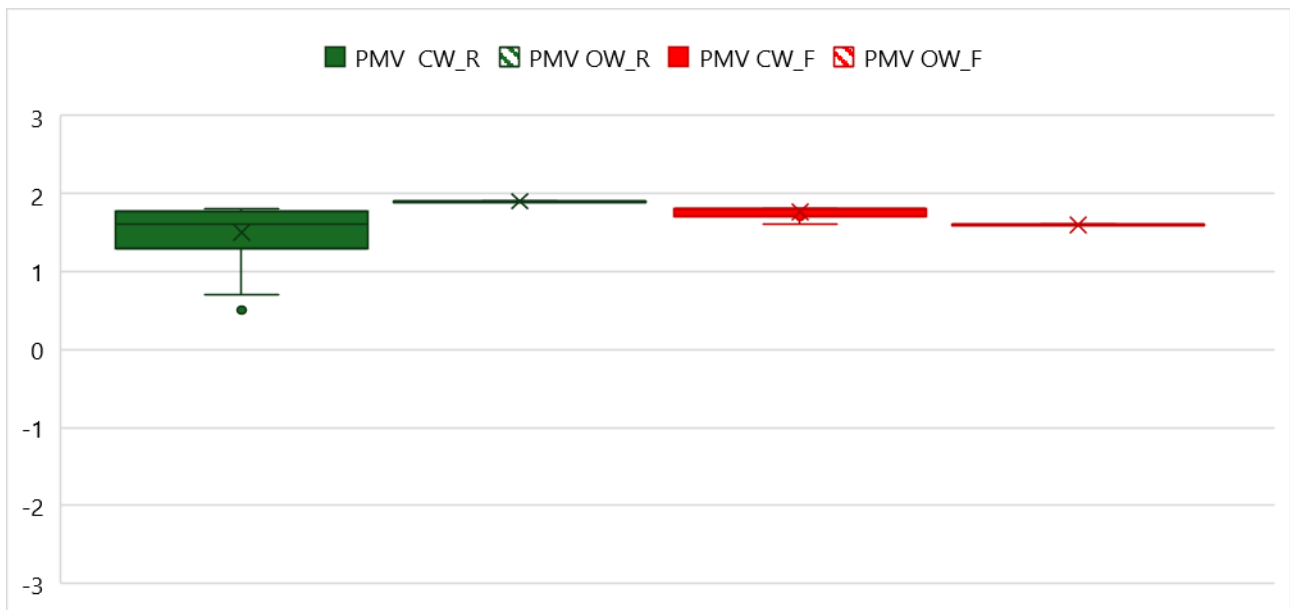


Figura 139_Grafici box plot del PMV registrato dal manichino per le aule di Falconara e Recanati in condizioni di finestre aperte e chiuse

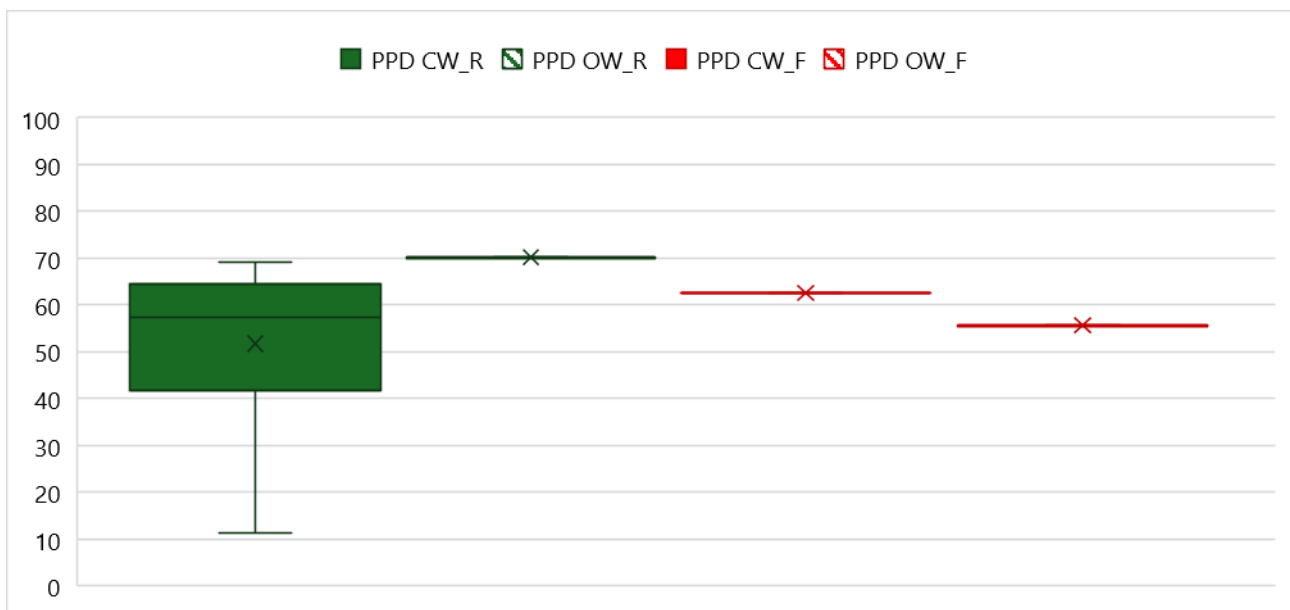


Figura 140__Grafici box plot del PPD registrato dal manichino per le aule di Falconara e Recanati in condizioni di finestre aperte e chiuse

Le temperature equivalenti medie registrate dalle 27 zone del manichino e ricadenti nelle aree a 10 cm, 60 cm e 110 cm da terra risultano essere pari a:

1. 29,98°C a 10 cm, 30,76°C a 60 cm e 30,45°C a 110 cm, con un ΔT_{110-10} di 0,47°C e 31,66°C a 10 cm, 31,21°C a 60 cm e 30,33°C a 110 cm, con un ΔT_{110-10} di -1,33°C rispettivamente per le aule di Falconara e Recanati nelle condizioni di finestre aperte e porta chiusa.
2. 30,3°C a 10 cm, 31,17°C a 60 cm e 30,74°C a 110 cm, con un ΔT_{110-10} di 0,44°C e 31,27°C a 10 cm, 30,29°C a 60 cm e 29,85°C a 110 cm, con un ΔT_{110-10} di -1,42°C rispettivamente per le aule di Falconara e Recanati nelle condizioni di finestre chiuse e porta chiusa.

In condizioni di finestre chiuse, le parti del corpo del manichino che ricadono nella zona a 10 cm, registrano una temperatura equivalente maggiore di 1 grado nell'aula di Recanati piuttosto che

nell'aula di Falconara, le parti del corpo del manichino che ricadono nella zona a 60 cm (zona centrale del corpo), registrano una temperatura equivalente media maggiore a Falconara rispetto a Recanati. Come è possibile notare dal grafico in Figura 141, le parti del manichino a contatto con la sedia risultano avere temperature equivalenti molto maggiori a Falconara. Anche le parti del corpo del manichino che ricadono nella zona a 110 cm, registrano in media una temperatura equivalente maggiore a Falconara, nello specifico si evidenziano le zone del petto e soprattutto della parte alta della schiena che hanno valori elevati rispetto a quelli di Recanati.

In condizioni di finestre aperte, le parti del corpo del manichino che ricadono nella zona a 10 cm, registrano una temperatura equivalente maggiore nell'aula di Recanati come per la condizione a finestre chiuse. Per le parti del corpo del manichino che ricadono nella zona a 60 cm le temperature equivalenti si eguagliano per le due aule eccetto le parti del corpo scoperte da indumenti (mani e avambracci a Falconara risultano registrare una temperatura equivalente minore). Anche per le parti del corpo del manichino che ricadono nella zona a 110 cm le temperature equivalenti sono confrontabili eccetto la parte alta della schiena dove a Falconara si registrano temperature maggiori.

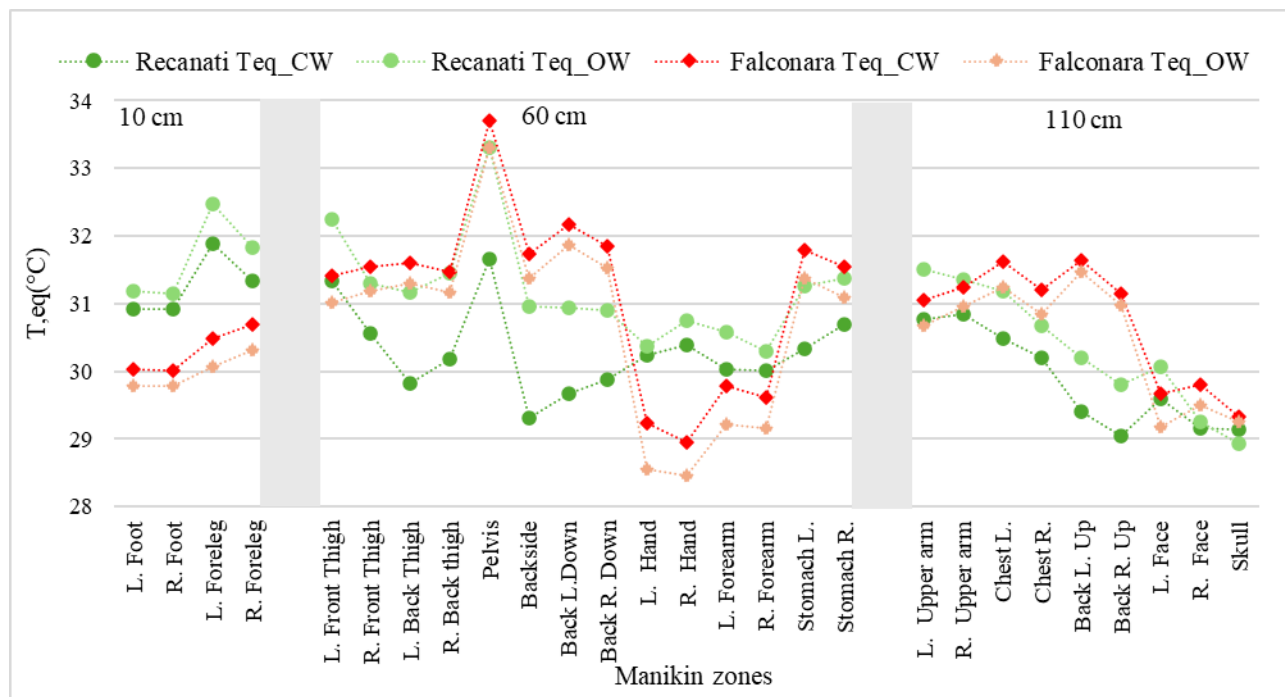


Figura 141 _ Grafico dell'andamento della temperatura equivalente di tutte le zone del Manichino per Falconara e Recanati in condizioni di finestre aperte e chiuse

	Recanati Teq_CW	Recanati Teq_OW	Falconara Teq_CW	Falconara Teq_OW
MEDIE 10 cm	31,26579	31,65538	30,3	29,98636
MEDIE 60 cm	30,29323	31,20829	31,17166	30,75628
MEDIE 110 cm	29,85015	30,32999	30,74409	30,45387
Δ110-10	-1,41564	-1,32539	0,444086	0,467508

Tabella 19 _ Temperature equivalenti medie per ogni zona e calcolo Δ110-10

Contemporaneamente alle misure effettuate con il manichino termico per valutare il comfort, sono state acquisite le temperature dell'aria e la velocità dell'aria nello stesso punto di acquisizione (vicino alla cattedra) e si nota che nelle zone a 60 cm e 110 cm, per entrambe le aule, le temperature dell'aria

sono minori a finestre aperte. Inoltre, a Falconara c'è un maggior gradiente termico in entrambe le condizioni a finestre aperte e chiuse rispetto che a Recanati. Tabella 20

zona	Recanati	Recanati	Falconara	Falconara
	Ta, i_CW	Ta, i_OW	Ta, i_CW	Ta, i_OW
10 cm	27,51	27,55	27,41	27,07
60 cm	27,90	27,73	28,07	27,58
110 cm	28,09	27,91	28,52	27,98
media	27,83	27,73	28	27,54
$\Delta 110-10$	0,58	0,36	1,11	0,91

Tabella 20_Temperature dell'aria registrate con la Dantec vicino alla cattedra

Le velocità medie dell'aria in condizioni di finestre chiuse e aperte a Recanati sono rispettivamente pari a 0,026 e 0,123. A Falconara la velocità dell'aria media in condizioni di finestre chiuse è di 0,029 m/s mentre a finestre aperte è di 0,072 m/s, ma in quest'ultima condizione, tra la velocità registrata a 10 cm da terra (0,054 m/s) e quella registrata a 110 cm da terra (0,102 m/s) c'è un aumento di velocità quasi del doppio. Tabella 21

zona	Recanati	Recanati	Falconara	Falconara
	V, a CW	V, a OW	V, a CW	V, a OW
10 cm	0,026	0,122	0,027	0,054
60 cm	0,026	0,124	0,030	0,061
110 cm	0,027	0,123	0,030	0,102
media	0,026	0,123	0,029	0,072

Tabella 21_Velocità dell'aria registrate con la Dantec vicino alla cattedra

I dati ottenuti dall'analisi sperimentale-comparativa effettuata sulle due aule sono riassunti nella Tabella 22.

	FALCONARA	RECANATI
	Archetipi	
VMC	D	DI
Forma aula	quadrata	quadrata
% finestrata	53	28
	Analisi sul medio periodo	
Ta, media (°C)	23,4	21,6
CO2, media (ppm)	964	729
	Mappatura 3D del comfort	
$\Delta T, a$ (m/s)	0,74	0,41
Va, avg (m/s)	0,08	0,03
Va, max (m/s)	0,68	0,04
DR (%)	0%-85%	0%-0,32%
PMV min	-0,95	-0,43
PMV max	-1,48	-0,51
PPD min (%)	10	8,86
PPD max (%)	50,16	10,53
	Analisi Manichino Termico	
PMV, OW	1,6	1,8
PMV, CW	1,8	1,5
PPD, OW (%)	58	67
PPD, CW (%)	65	52
Teq, 10 cm OW	29,98	31,66
Teq, 10 cm CW	30,3	31,27
Teq, 60 cm OW	30,76	31,21
Teq, 60 cm CW	31,17	30,29
Teq, 110 cm OW	30,45	30,33
Teq, 110 cm CW	30,74	29,85
ΔT_{110-10} OW	0,47	-1,33
ΔT_{110-10} CW	0,44	-1,42

Tabella 22 _Elenco delle caratteristiche delle due aule dal punto di vista degli archetipi e dei dati derivanti da analisi sperimentali

Dal confronto tra i dati di cui si è discusso, è emerso che l'aula di Recanati, con impianto delocalizzato con unità e canali interni all'aula (DI), rispetto all'aula di Falconara, con impianto delocalizzato con unità di ventilazione interna alle aule (D), garantisce una maggiore efficienza dell'impianto e una miglior distribuzione dell'aria immessa. Inoltre, a Recanati, si registrano livelli di CO₂ più bassi, sinonimo del fatto che la ventilazione è efficace, e dal punto di vista del comfort termico, grazie alla mappatura 3D del comfort, si registra una condizione più vicina al benessere dell'utente con una percentuale di insoddisfatti molto bassa.

Una delle carenze evidenziate per le due aule riguardo i sistemi di ventilazione è la loro gestione manuale, infatti, a volte la velocità dell'impianto viene variata a causa del rumore generato dai ventilatori oppure l'impianto rimane spento perché c'è scarsa informazione sulla modalità di accensione. Questo problema è stato individuato anche in letteratura, in particolare, uno studio indica che nella maggior parte dei casi l'inefficienza della ventilazione meccanica è strettamente legata alla mancanza di formazione degli occupanti sul suo corretto utilizzo. La soluzione ottimale per mantenere una qualità dell'aria interna accettabile e garantire il comfort termico e la salute degli occupanti è l'utilizzo di sistemi ibridi controllati automaticamente con algoritmi intelligenti basati su

una caratterizzazione oggettiva e percettiva di tutti i domini ambientali come è stato riportato negli studi di Torresin et al.[67]. Inoltre, se ben regolato attraverso un'adeguata strategia di controllo, il sistema di ventilazione ibrido sembra promettente nel mantenere ambienti interni sani riducendo anche il consumo energetico come dimostrato da Tognon et al.[68].

6 Conclusione

Lo studio effettuato in questa tesi riguarda la caratterizzazione geometrica, impiantistica, termofisica e di qualità dell'aria di aule scolastiche primarie e secondarie dotate di ventilazione meccanica controllata (VMC) della Regione Marche. Tale lavoro è avvenuto in due fasi: la prima ha permesso di identificare gli archetipi delle aule, mentre la seconda, grazie ad un'analisi comparativa sperimentale ha permesso di individuare in maniera tridimensionale il comfort termico degli spazi studiati e la qualità dell'aria in funzione alle diverse macchine di ventilazione.

Attraverso l'integrazione e lo screening di database nazionali e regionali sono state individuate 177 scuole dotate di VMC nella regione Marche, pari al 12% del totale, da cui sono stati dedotti gli archetipi delle aule scolastiche caratterizzate da:

- Quattro tipologie di impianti di ventilazione meccanica controllata
 1. Il 94% di scuole con impianto delocalizzato con unità di ventilazione interna alle aule (D).
 2. Il 3% di scuole con impianto delocalizzato con unità e canali interni all'aula (DI)
 3. il 2% di scuole con impianto delocalizzato con unità esterne all'aula (DE)
 4. l'1% di scuole con impianto centralizzato (C)
- Tre geometrie con differenti percentuali finestrate:
 1. Il 37% delle aule sono ampie con il 40% di area finestrata (5,3% di fattore medio di luce diurna);
 2. il 51% delle aule sono quadrate con il 30% di area finestrata (3,6% di fattore medio di luce diurna);
 3. il 12% delle aule sono profonde con il 40% di area finestrata (4,2% di fattore medio di luce diurna).

Diminuendo l'area finestrata si può garantire il fattore medio di luce diurna pari al 3% rispettivamente con:

- il 23% di area finestrata per l'aula ampia;
- il 28% di area finestrata per l'aula quadrata;
- il 33% di area finestrata per l'aula profonda.

Nella seconda fase del lavoro, considerando l'archetipo di aula quadrata (che risulta più frequente), è stata effettuata un'analisi comparativa sperimentale per 5 giorni (dal 22/05/2023 al 26/05/2023) su due aule: una della scuola di Falconara e una della scuola di Recanati.

I due ambienti, caratterizzati da dimensioni e numero di occupanti simili, differiscono solo per la tipologia di ventilazione meccanica: Falconara con impianto delocalizzato con unità di ventilazione interna alle aule (D) e Recanati con impianto delocalizzato con unità e canali interni all'aula (DI).

Da quest'analisi si evidenzia che:

1. I livelli medi settimanali di CO₂ registrati all'interno dell'aula a Falconara sono maggiori del 24% rispetto all'aula di Recanati (considerando la fascia di occupazione degli utenti nelle aule dalle 8:20 alle 12:20). Inoltre, dalla media giornaliera di CO₂, la classe di Recanati supera il limite fissato dall'OMS di 1000 ppm in un solo giorno per lo 0,7%, mentre Falconara lo supera 2 giorni di un valore pari all'8%.

2. la temperatura media settimanale dell'aria risulta essere di 21,6°C e di 23,4°C rispettivamente per Recanati e Falconara.

Effettuando per entrambe le aule una mappatura tridimensionale del comfort in condizioni stazionarie (porta e finestre chiuse e velocità costante dell'impianto) nel periodo maggio si è evidenziato che:

1. Le temperature dell'aria sono più alte in corrispondenza dei banchi vicini alle finestre a causa della radiazione solare entrante e dello scambio termico attraverso l'infisso (alta trasmittanza termica). Si ipotizza quindi che in fase invernale tali punti registreranno le temperature più basse rispetto a quelli più distanti dagli infissi.
2. Il gradiente orizzontale medio (temperatura dell'aria del punto più vicino alla finestra meno temperatura dell'aria del punto più distante dalla finestra) risulta essere di 0,74°C e di 0,41°C rispettivamente per Falconara e Recanati.
3. Nonostante le velocità medie dell'aria dell'aula di Falconara (0.08m/s) e di Recanati (0.03m/s) risultino essere minori del limite imposto di 0.15 m/s, per l'aula di Falconara si evidenziano valori di velocità dell'aria fino a 0.68 m/s in corrispondenza della zona antistante alla macchina di tipologia D. Per Recanati invece, dove è presente la macchina di tipologia DI, il valore massimo risulta essere di 0.04 m/s in corrispondenza di una delle bocchette di ripresa dell'aria. È possibile dire quindi che l'impianto DI garantisca una migliore e più omogenea distribuzione dell'aria.
4. L'indice di discomfort locale DR, coerentemente a quanto riportato nel punto precedente risulta variare tra 0% e 85% per Falconara e tra 0% e 0.32% per Recanati. A Falconara si evidenzia un valore massimo del draught rate pari all'85% in corrispondenza della zona antistante alla macchina di tipologia D mentre a Recanati il valore massimo è pari allo 0,32% in corrispondenza di una delle bocchette di mandata dell'aria.
5. L'indice di discomfort globale PMV varia tra -0,95 e -1,48 (tra leggermente freddo e freddo), con una percentuale di insoddisfatti PPD tra il 10% e il 50,16% a Falconara mentre il PMV varia tra -0,43 e -0,51 (tra neutro e leggermente freddo) con una percentuale di insoddisfatti PPD tra l'8,86% e il 10,53% a Recanati. Nello specifico la zona in cui si registra un PMV di -1,48 con una percentuale di insoddisfatti PPD del 50,16% è quello in corrispondenza della zona antistante alla macchina di tipologia D nell'aula a Falconara.

Effettuando per entrambe le aule una valutazione del comfort termico estivo (giugno-luglio) attraverso un Manichino termico adulto a 27 zone differenziate si è evidenziato che nella zona della cattedra l'insegnante percepisce una condizione termica equivalente ad:

- un PMV medio pari a 1,8 (caldo) e PPD medio di 65% e un PMV medio di 1,5 (caldo) e PPD medio del 52% rispettivamente per Falconara e Recanati in condizione di finestre e porta chiuse.
- un PMV medio pari a 1,6 (caldo) e PPD medio di 58% e un PMV medio di 1,8 (caldo) e PPD medio del 67% rispettivamente per Falconara e Recanati in condizione di finestre aperte e porta chiusa.

Le temperature equivalenti medie registrate dalle 27 zone del manichino e ricadenti nelle aree a 10 cm, 60 cm e 110 cm da terra risultano essere pari a:

- 29,98°C a 10 cm, 30,76°C a 60 cm e 30,45°C a 110 cm, con un ΔT_{110-10} di 0,47°C e 31,66°C a 10 cm, 31,21°C a 60 cm e 30,33°C a 110 cm, con un ΔT_{110-10} di -1,33°C rispettivamente per le aule di Falconara e Recanati nelle condizioni di finestre aperte e porta chiusa.
- 30,3°C a 10 cm, 31,17°C a 60 cm e 30,74°C a 110 cm, con un ΔT_{110-10} di 0,44°C e 31,27°C a 10 cm, 30,29°C a 60 cm e 29,85°C a 110 cm, con un ΔT_{110-10} di -1,42°C rispettivamente per le aule di Falconara e Recanati nelle condizioni di finestre chiuse e porta chiusa.

Alla luce di quanto riportato sopra, si evince che la tipologia di impianto di ventilazione con unità e canali interni all'aula (DI), risulta essere la miglior soluzione capace di favorire il maggior comfort all'utente e livelli di CO₂ adeguati. Inoltre, le valutazioni fatte nella presente sperimentazione sono riferite alle aule scolastiche, perché sono considerate luoghi frequentati da utenti fragili, ma si potrebbero estendere a tutti i luoghi multi-occupati come ad esempio uffici, mense e case di riposo.

Gli aspetti evidenziati in questo elaborato potrebbero essere utili ai progettisti per identificare i sistemi di ventilazione più efficienti dal punto di vista del comfort termico e della qualità dell'aria. Inoltre, potrebbero essere sviluppate applicazioni intelligenti, reattive e automatizzate basate su dati che gestiscono in modo proattivo la qualità dell'aria, la salubrità dell'ambiente e migliorano il benessere degli studenti.

Infatti, studi futuri potrebbero prevedere controlli automatizzati delle concentrazioni di anidride carbonica (livelli massimi e medi), potrebbero considerare l'interazione degli utenti con la ventilazione naturale (apertura finestre) e la presenza o assenza degli studenti nell'aula. Tutto ciò si potrebbe concretizzare attraverso lo sviluppo di cruscotti interattivi che mostrano i livelli di qualità dell'aria in tempo reale e possono fornire al personale scolastico informazioni utili al fine di adottare misure preventive per mantenere un ambiente interno sano.

Un sistema HVAC intelligente ed automatizzato, nel medio periodo, può consentire l'apertura delle finestre e garantire i ricambi orari mancanti attraverso la ventilazione meccanica abbassando la velocità dell'impianto. Così facendo si può migliorare la qualità dell'aria interna agli edifici e si possono evitare sprechi energetici.

Bibliografia

- [1] Dipartimento Unità per l'Efficienza Energetica, "Indoor Environmental Quality," 15 Ottobre 2019. <https://www.efficienzaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-q/qualita-ambientale-degli-interni.html>
- [2] M. Pahlavikhah Varnosfaderani, A. Heydarian, and F. Jazizadeh, "A longitudinal study of IAQ metrics and the efficacy of default HVAC ventilation," *Build. Environ.*, vol. 254, no. February, 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111353.
- [3] I. Snow, P. Track, R. Slopes, C. Worldwide, S. D. Heaters, and C. Heaters, "Thermal Comfort Thermal Comfort," pp. 1–7, 2012.
- [4] "Parametri di qualità ambientale indoor," *Ottobre 2, 2020*. <https://medium.com/@ieqandwellbeing/indoor-environmental-quality-parameter-56aab5cffd8>
- [5] World Health Organization, "World Health Organization – Burden of Disease From the Joint Effects of Household and Ambient Air Pollution for 2012," 2014.
- [6] N. E. KLEPEIS *et al.*, "The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants," *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 11, no. 3, pp. 231–252, 2001, doi: 10.1038/sj.jea.7500165.
- [7] B. Poirier, G. Guyot, M. Woloszyn, H. Geoffroy, M. Ondarts, and E. Gonze, "Development of an assessment methodology for IAQ ventilation performance in residential buildings: An investigation of relevant performance indicators," *J. Build. Eng.*, vol. 43, p. 103140, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103140>.
- [8] S. Brasche and W. Bischof, "Daily time spent indoors in German homes – Baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants," *Int. J. Hyg. Environ. Health*, vol. 208, no. 4, pp. 247–253, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2005.03.003>.
- [9] M. Jantunen, E. Oliveira Fernandes, P. Carrer, and S. Kephelopoulos, "European Commission, Directorate General for Health & Consumers. Promoting actions for healthy indoor air (IAIAQ)," *Eur. Comm. Luxemb.*, 2011.
- [10] S. Sadat Korsavi, A. Montazami, and J. Brusey, "Developing a design framework to facilitate adaptive behaviours," *Energy Build.*, vol. 179, pp. 360–373, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.011>.
- [11] N. Abbasabadi and M. Ashayeri, "Urban energy use modeling methods and tools: A review and an outlook," *Build. Environ.*, vol. 161, p. 106270, 2019.
- [12] J. Keirstead, M. Jennings, and A. Sivakumar, "A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3847–3866, 2012.
- [13] P. Shen and B. Yang, "Projecting Texas energy use for residential sector under future climate and urbanization scenarios: A bottom-up method based on twenty-year regional energy use data," *Energy*, vol. 193, p. 116694, 2020.
- [14] A. Ramokone, O. Popoola, A. Awelewa, and A. Temitope, "A review on behavioural

propensity for building load and energy profile development--Model inadequacy and improved approach,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 45, p. 101235, 2021.

- [15] K. N. Streicher, P. Padey, D. Parra, M. C. Bürer, S. Schneider, and M. K. Patel, “Analysis of space heating demand in the Swiss residential building stock: Element-based bottom-up model of archetype buildings,” *Energy Build.*, vol. 184, pp. 300–322, 2019.
- [16] U. F. Oberegger, R. Perneti, and R. Lollini, “Bottom-up building stock retrofit based on leveled cost of saved energy,” *Energy Build.*, vol. 210, p. 109757, 2020.
- [17] Z. Deng, Y. Chen, J. Yang, and F. Causone, “AutoBPS: A tool for urban building energy modeling to support energy efficiency improvement at city-scale,” *Energy Build.*, vol. 282, p. 112794, 2023.
- [18] P. Shen and N. Lior, “Vulnerability to climate change impacts of present renewable energy systems designed for achieving net-zero energy buildings,” *Energy*, vol. 114, pp. 1288–1305, 2016.
- [19] J. Xiong, S. Guo, Y. Wu, D. Yan, C. Xiao, and X. Lu, “Predicting the response of heating and cooling demands of residential buildings with various thermal performances in China to climate change,” *Energy*, vol. 269, p. 126789, 2023.
- [20] J. L. Reyna and M. V Chester, “Energy efficiency to reduce residential electricity and natural gas use under climate change,” *Nat. Commun.*, vol. 8, no. 1, p. 14916, 2017.
- [21] P. Shen and H. Wang, “Archetype building energy modeling approaches and applications: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 199, p. 114478, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114478>.
- [22] Y. Schwartz *et al.*, “Developing a Data-driven school building stock energy and indoor environmental quality modelling method,” *Energy Build.*, vol. 249, p. 111249, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111249>.
- [23] J. PORTELLA and M. RIBAS, “Bottom-up description of the French building stock, including archetype buildings and energy demand,” 2012.
- [24] M. S. Gheraldi *et al.*, “Evaluating the impact of the shape of school reference buildings on bottom-up energy benchmarking,” *J. Build. Eng.*, vol. 43, p. 103142, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103142>.
- [25] D. W. Kim *et al.*, “Development of Reference Building Energy Models for South Korea,” *Proceedings of Building Simulation 2017: 15th Conference of IBPSA*, vol. 15. in Building Simulation, vol. 15. IBPSA, San Francisco, USA, pp. 2693–2700, 2017. doi: <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.789>.
- [26] S. Yilamz, P. Murray, A. Bollinger, and G. Guidati, “Hourly demand profiles for space heating and electricity,” *SCCER Jt. Act. Scenar. Model.*, 2020.
- [27] M. Alrasheed and M. Mourshed, “Building stock modelling using k-prototype: A framework for representative archetype development,” *Energy Build.*, vol. 311, p. 114111, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114111>.
- [28] K. K. Kalimeri *et al.*, “Indoor air quality investigation of the school environment and estimated health risks: Two-season measurements in primary schools in Kozani, Greece,” *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 7, no. 6, pp. 1128–1142, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.07.002>.

- [29] J. Moya, C. F. Bearer, and R. A. Etzel, “Children’s Behavior and Physiology and How It Affects Exposure to Environmental Contaminants,” *Pediatrics*, vol. 113, no. Supplement_3, pp. 996–1006, 2004, doi: 10.1542/peds.113.S3.996.
- [30] J. Ciencewicki, S. Trivedi, and S. R. Kleeberger, “Oxidants and the pathogenesis of lung diseases,” *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 122, no. 3, pp. 456–468, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2008.08.004>.
- [31] K. R. Smith, J. M. Samet, I. Romieu, and N. Bruce, “Indoor air pollution in developing countries and acute lower respiratory infections in children,” *Thorax*, vol. 55, no. 6, pp. 518–532, 2000, doi: 10.1136/thorax.55.6.518.
- [32] P. Wargocki and D. P. Wyon, “The Effects of Outdoor Air Supply Rate and Supply Air Filter Condition in Classrooms on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257),” *HVAC\&R Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 165–191, 2007, doi: 10.1080/10789669.2007.10390950.
- [33] J. Dong, N. Goodman, and P. Rajagopalan, “A Review of Artificial Neural Network Models Applied to Predict Indoor Air Quality in Schools,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 20, no. 15, 2023, doi: 10.3390/ijerph20156441.
- [34] J. T. M. Rosbach, M. Vonk, F. Duijm, J. T. van Ginkel, U. Gehring, and B. Brunekreef, “A ventilation intervention study in classrooms to improve indoor air quality: the FRESH study,” *Environ. Heal.*, vol. 12, no. 1, p. 110, 2013, doi: 10.1186/1476-069X-12-110.
- [35] N. Gao, M. Marschall, J. Burry, S. Watkins, and F. D. Salim, “Understanding occupants’ behaviour, engagement, emotion, and comfort indoors with heterogeneous sensors and wearables,” *Sci. Data*, vol. 9, no. 1, p. 261, 2022, doi: 10.1038/s41597-022-01347-w.
- [36] L. Li, Y. Zhang, J. C. H. Fung, H. Qu, and A. K. H. Lau, “A coupled computational fluid dynamics and back-propagation neural network-based particle swarm optimizer algorithm for predicting and optimizing indoor air quality,” *Build. Environ.*, vol. 207, p. 108533, 2022.
- [37] Y. Zhu, S. A. Al-Ahmed, M. Z. Shakir, and J. I. Olszewska, “LSTM-based IoT-enabled CO2 steady-state forecasting for indoor air quality monitoring,” *Electronics*, vol. 12, no. 1, p. 107, 2022.
- [38] S. S. Korsavi, A. Montazami, and D. Mumovic, “Indoor air quality (IAQ) in naturally-ventilated primary schools in the UK: Occupant-related factors,” *Build. Environ.*, vol. 180, p. 106992, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106992>.
- [39] P. V. Dorizas, M.-N. Assimakopoulos, and M. Santamouris, “A holistic approach for the assessment of the indoor environmental quality, student productivity, and energy consumption in primary schools,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 187, pp. 1–18, 2015.
- [40] M. Tajima, T. Yorimitsu, and Y. Shimada, “Accuracy Improvement for Estimating Indoor Carbon Dioxide Concentration Produced by Occupants,” 2018.
- [41] A. K. Persily and L. De Jonge, “Carbon dioxide generation and building occupants,” *ASHRAE J.*, vol. 59, no. 7, pp. 64 – 66, 2017.
- [42] A. Persily and L. de Jonge, “Carbon dioxide generation rates for building occupants,” *Indoor Air*, vol. 27, no. 5, pp. 868 – 879, 2017, doi: 10.1111/ina.12383.
- [43] A. Persily, “Development and application of an indoor carbon dioxide metric,” *Indoor Air*, vol. 32, no. 7, p. e13059, 2022, doi: <https://doi.org/10.1111/ina.13059>.
- [44] M. Martínez-Comesaña, A. Ogando-Martínez, F. Troncoso-Pastoriza, J. López-Gómez, L.

- Febrero-Garrido, and E. Granada-Álvarez, “Use of optimised MLP neural networks for spatiotemporal estimation of indoor environmental conditions of existing buildings,” *Build. Environ.*, vol. 205, p. 108243, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108243>.
- [45] L. C. Tagliabue, F. Re Cecconi, S. Rinaldi, and A. L. C. Ciribini, “Data driven indoor air quality prediction in educational facilities based on IoT network,” *Energy Build.*, vol. 236, p. 110782, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110782>.
- [46] M. Marzouk and M. Atef, “Assessment of Indoor Air Quality in Academic Buildings Using IoT and Deep Learning,” *Sustainability*, vol. 14, no. 12, 2022, doi: 10.3390/su14127015.
- [47] M. M. Andamon, P. Rajagopalan, and J. Woo, “Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO₂ concentration measurements,” *Build. Environ.*, vol. 237, no. February, p. 110313, 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110313.
- [48] S. B. Sørensen and K. Kristensen, “Low-cost sensor-based investigation of CO₂ and volatile organic compounds in classrooms: Exploring dynamics, ventilation effects and perceived air quality relations,” *Build. Environ.*, vol. 254, no. February, 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111369.
- [49] S. Hama, P. Kumar, A. Tiwari, Y. Wang, and P. F. Linden, “The underpinning factors affecting the classroom air quality , thermal comfort and ventilation in 30 classrooms of primary schools in London,” *Environ. Res.*, vol. 236, no. P2, p. 116863, 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.116863.
- [50] T. Dele, A. Sanusi, M. Hafeez, and A. Nasir, “Energy & Buildings From perception to prediction : A comparative study of thermal comfort assessment techniques in school facilities,” *Energy Build.*, vol. 313, no. March, p. 114233, 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114233.
- [51] Z. El, Y. Bouzidi, A. Merabtine, and G. Polidori, “Assessment of thermal comfort of frail people in a sitting posture under non-uniform conditions using a thermal manikin,” *Build. Environ.*, vol. 221, no. April, p. 109334, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109334.
- [52] S. S. Korsavi, R. V Jones, and A. Fuertes, “Factors influencing the state of blinds and lights in primary schools : Behavioural models and opportunities to improve children ’ s visual environment,” *J. Build. Eng.*, vol. 61, no. September, p. 105303, 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.105303.
- [53] Minister of Education Universities and Research, “Portale unico dei dati della scuola,” *Ministero dell’Istruzione e del Merito*, 2023.
- [54] Minister of Education Universities and Research, *Law 107/2015 - Reform of the national education and training system and delegation for the reorganisation of existing legislative provisions*. Italy, 2015.
- [55] S. Petersen, K. L. Jensen, A. L. S. Pedersen, and H. S. Rasmussen, “The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced CO₂ concentration on the performance of schoolwork by children,” *Indoor Air*, vol. 26, no. 3, pp. 366–379, 2016, doi: <https://doi.org/10.1111/ina.12210>.
- [56] CEN European Committee for Standardization, *EN ISO 7726:2001 Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities*. 2001.
- [57] CEN European Committee for Standardization, *EN ISO 16000-26:2012 Indoor air - Part 26: Sampling strategy for carbon dioxide (CO₂)*. 2012.

- [58] Ministri per i lavori pubblici e per la pubblica istruzione, *Italian Ministerial Decree 18/12/75, Upgraded technical standards relating to school construction, including minimum indices of educational, building and urban functionality, to be observed in the execution of school construction works*. 1975.
- [59] CEN European Committee for Standardization, *EN 16798-1:2019 Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acous*. 2019.
- [60] Á. Muelas *et al.*, “Analysis of different ventilation strategies and CO2 distribution in a naturally ventilated classroom,” *Atmos. Environ.*, vol. 283, p. 119176, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119176>.
- [61] President of the Republic, *Presidential Decree No. 412 of August 26, 1993*. Italy, 1993.
- [62] “Tecplot 360.” <https://tecplot.com/products/tecplot-360/>
- [63] H. H. Jo, Y. Kang, and S. Kim, “Synergistic approaches to elevate indoor air quality: A holistic examination of classroom refinement, air exchange optimization, and flooring material impact,” *Environ. Pollut.*, vol. 349, p. 123920, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123920>.
- [64] CEN European Committee for Standardization, *EN ISO 16890-1:2017 Air filters for general ventilation - Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM)*. 2017.
- [65] L. M. Campagna and F. Fiorito, “On the energy performance of the Mediterranean school building stock: The case of the Apulia Region,” *Energy Build.*, vol. 293, no. May, p. 113187, 2023, doi: [10.1016/j.enbuild.2023.113187](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113187).
- [66] M. Alwetaishi, “Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: A case study,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 6–18, 2019, doi: [10.1016/j.jksues.2017.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.03.001).
- [67] S. Torresin, F. Aletta, T. Oberman, V. Vinciotti, R. Albatici, and J. Kang, “Measuring, representing and analysing indoor soundscapes: A data collection campaign in residential buildings with natural and mechanical ventilation in England,” *Build. Environ.*, vol. 243, no. March, p. 110726, 2023, doi: [10.1016/j.buildenv.2023.110726](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110726).
- [68] G. Tognon, M. Marigo, M. De Carli, and A. Zarrella, “Mechanical, natural and hybrid ventilation systems in different building types: Energy and indoor air quality analysis,” *J. Build. Eng.*, vol. 76, p. 107060, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107060>.