



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

**Dipartimento di Ingegneria Industriale
Tesi Magistrale in Ingegneria Meccanica**

Strumenti e linee guida progettuali per la ventilazione meccanica nelle aule scolastiche mediante simulazioni CFD

Relatore:

Prof. Perino Marco
Prof. Fracastoro Giovanni Vincenzo

Correlatore:

Ing. Bo Giorgio

Candidato

Andrea Lena

Student ID

289286

Anno Accademico 2023

Abstract

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

Alla luce anche dei recenti eventi pandemici che hanno evidenziato alcune criticità sanitarie in parte legate alla qualità dell'aria in ambienti confinati, in questo progetto di tesi sono state analizzate due diverse strategie di ventilazione meccanica realizzabili anche in interventi di retrofit sulle scuole. Saranno messe a confronto la ventilazione meccanica a completa miscelazione tramite sistema decentralizzato e la ventilazione a dislocamento. Dopo un'attenta analisi sullo stato dell'arte delle leggi e degli inquinanti indoor, saranno svolte diverse analisi CFD per verificare l'efficacia di questi due sistemi, sottolineandone vantaggi e criticità, stabilendo una linea guida di applicabilità per scuole elementari, medie e superiori al variare di parametri geometrici delle aule.

A valle della definizione di tali linee guida, insite in maniera rigorosa all'interno delle prescrizioni legislative vigenti, sarà effettuata un'analisi critica dei parametri di legge (ed in particolare dei ricambi orari di aria esterna prescritti) tali da evidenziare, a parità di condizioni interne ritenute accettabili in letteratura, soluzioni progettuali alternative e quindi dei vantaggi in termini di risparmi energetici operativi che si possono conseguire. Il presente lavoro di tesi apre pertanto diversi scenari per sviluppi futuri: un'analisi tecnico-economica più approfondita sull'installazione e sull'investimento iniziale della ventilazione meccanica nelle aule potrebbe rendere più accessibile questa tecnologia a edifici esistenti e garantire così una qualità dell'aria interna accettabile con un consumo ridotto di energia.

Indice

Elenco delle figure	vii
Elenco delle tabelle	xi
Abbreviazioni	xiii
Introduzione	xiv
1 Qualità dell'aria e ventilazione	1
1.1 Qualità dell'ambiente interna - IAQ	1
1.1.1 Percezione della qualità dell'aria	2
1.1.2 Salute	3
1.1.3 Produttività	4
1.1.4 COVID-19	5
1.2 Ventilazione	6
1.2.1 Ventilazione naturale	8
1.2.2 Ventilazione meccanica	10
1.2.3 Ventilazione mista o ibrida	16
1.2.4 Vantaggi svantaggi ventilazione meccanica e ventilazione naturale	17
2 Ventilazione a dislocamento	20
2.1 Fisica della ventilazione a dislocamento	22
2.1.1 Immissione dell'aria	25
2.1.2 Distribuzione degli inquinanti	27

2.2	Indici per valutare l'efficienza di ventilazione	28
2.2.1	Età dell'aria	29
2.2.2	Air change efficiency - ACE	29
2.2.3	Contaminant removal effectiveness - CRE	31
2.2.4	Local air quality index	32
2.3	Comfort termico globale	32
2.3.1	Indici di comfort termico globale	33
2.3.2	Discomfort termico locale	35
3	Situazione normativa e inquinanti indoor	38
3.1	Situazione normativa	39
3.1.1	Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975	39
3.1.2	UNI 10339	41
3.1.3	UNI EN 16798-1	42
3.1.4	Criteri Ambientali Minimi - CAM	43
3.2	Inquinanti da monitorare	45
3.2.1	Anidride carbonica	45
3.2.2	Radon	49
3.2.3	Composti organici volatili - COV	49
3.2.4	Particolato	50
4	Metodologia: Casi studio e Modelli	51
4.1	Casi studio	52
4.1.1	Modelli con ventilazione a completa miscelazione MV	53
4.1.2	Modello con ventilazione a dislocamento DV	54
4.2	Computational fluid dynamics - CFD	55
4.2.1	Solutore CFD	56
4.2.2	Modello di turbolenza	57
4.2.3	Mesh	59
4.2.4	Materiali	62

4.2.5	Condizioni al contorno	62
5	Risultati	67
5.1	Linee guida di applicabilità ventilazione meccanica	67
5.1.1	Altezza aula 2,7 m	68
5.1.2	Altezza aula 3,5 m	79
5.1.3	Risultati ottenuti	87
5.2	Variazione posizione della bocchetta di ripresa	89
5.2.1	Variazione posizione ripresa in MV	90
5.2.2	Variazione posizione ripresa in DV	91
5.3	Analisi critica dei parametri di legge	92
5.3.1	Calcoli di risparmio energetico lungo tutto il periodo invernale . .	95
6	Conclusioni e sviluppi futuri	101
	Bibliografia	104

Elenco delle figure

1.1	Percentuale di insoddisfatti in funzione della qualità percepita dell'aria [1]	3
1.2	Percentuale di bambini con malattie respiratorie croniche in classi ben ventilate e poco ventilate [2]	4
1.3	Confronto tra ventilazione a completa miscelazione e a dislocamento [3]	5
1.4	Andamento nel tempo delle cariche virali elementari presenti nell'ambiente per ogni persona infetta, per diversi valori del tasso di ventilazione [4]	6
1.5	Andamento temporale della concentrazione di CO ₂ in un locale dove la fonte di inquinamento principale sono le persone [1]	7
1.6	Altezza del NPL per due aperture uguali (a) e diverse (b) [5]	8
1.7	Distribuzione dell'aria in una stanza con aperture superiori a vasistas in diverse condizioni [5]	9
1.8	Impianto di ventilazione centralizzato, una sola macchina per tutto l'edificio [6]	10
1.9	Impianto di ventilazione decentralizzato, una macchina per ogni ambiente [6]	11
1.10	Recuperatore di calore a flussi incrociati	12
1.11	Tecnologie di recupero termico [5]	13
1.12	Classificazione dei filtri [7]	14
1.13	Logica di regolazione della portata proporzionale	15
2.1	Ventilazione a dislocamento [8]	20
2.2	Sistema a completa miscelazione (MV) e a dislocamento (DV) a confronto [8]	21
2.3	Pennacchi termici generati da un punto e da un cilindro [8]	22

2.4	Bilancio di portata in un locale con ventilazione a dislocamento	23
2.5	Flusso d'aria convettivo q_v [$^3/s$] generato sopra di differenti sorgenti termiche al variare dell'altezza [9]	24
2.6	Variazione della direzione del flusso d'aria in ingresso a seconda della temperatura dell'aria di immissione rispetto alla temperatura della stanza	25
2.7	Forma della zona adiacente per diffusori a parete con diverse modalità di immissione dell'aria in ambiente [10]	26
2.8	Distribuzione verticale della concentrazione di CO_2 relativa per 3 diverse portate di aria di rinnovo	27
2.9	Pennacchio termico che richiama l'aria più pulita (colore azzurro) dal basso [11]	28
2.10	Età media dell'aria della stanza $\langle \bar{\tau} \rangle$ e età media dell'aria alla ripresa τ_n per differenti tipi di ventilazione [12]	30
2.11	PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti) in funzione del PMV (Voto Medio Previsto). Da UNI EN ISO 7730 [13]	34
2.12	Percentuale di insoddisfatti (PD) in funzione della differenza di temperatura tra testa e caviglie. Da UNI EN ISO 7730 [13]	36
2.13	Percentuale di insoddisfatti (PD) in funzione della temperatura del pavimento. Da UNI EN ISO 7730 [13]	36
2.14	Percentuale di insoddisfatti (PD) in funzione della temperatura radiante. Da UNI EN ISO 7730 [13]	37
3.1	Anno di costruzione scuole Italiane, dati scaricati dal sito del MIUR [14] .	38
3.2	Percentuale di scuole italiane con un impianto VMC [14]	39
3.3	Classificazione degli inquinanti indoor [15]	45
3.4	Concentrazione di CO_2 esterna negli anni, dati presi da <i>European Environment Agency</i> (EEA) [16]	46
3.5	Andamento qualitativo di CO_2 durante un'ora di lezione. Grafico generato dal tool open-source QAES [17]	47
3.6	Valori guida della CO_2 in ambiente indoor nelle legislazioni dei diversi Paesi europei [18]	48
3.7	Valori guida della CO_2 in ambiente indoor nelle legislazioni dei diversi Paesi extra-europei [18]	48

4.1	Modello 3D di una "classe tipo" con unità decentralizzata per MV	53
4.2	Modello 3D di una "classe tipo" con le unità a dislocamento per DV	54
4.3	Modello del dislocatore scelto con relativa zonna di prossimità	55
4.4	Decomposizione di una grandezza in parte media e in parte fluttuante	57
4.5	Infittimento della mesh localizzato all'uscita e all'ingresso del dominio	60
4.6	Sezione verticale del lato corto della mesh generata sul dominio	61
4.7	Sezione verticale del lato lungo della mesh, nel rettangolo in rosso si vede l'infittimento che è stato computato all'ingresso dell'aria per il caso di DV	61
4.8	Tassi di generazione di CO ₂ a 273 K e 101 kPa per intervalli di età e livello di attività fisica (in base alla massa corporea media di ciascun gruppo di età)	65
5.1	Modalità di immissione dell'aria per MV e DV	68
5.2	CO ₂ relativa [ppm] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 2,7m per MV e DV	69
5.3	Profilo verticale della differenza di concentrazione di CO ₂ [ppm] tra interno ed esterno in un'aula elementare/media/superiore di altezza 2,7m per MV e DV	70
5.4	Efficienza di ventilazione ACE in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza di 2,7 m	72
5.5	Efficienza di rimozione della CO ₂ CRE in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza di 2,7 m	72
5.6	Efficienza di rimozione della CO ₂ nella zona occupata (1,4 m) in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza di 2,7 m	73
5.7	Temperatura [°C] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 2,7 m per MV e DV	74
5.8	Profilo verticale della temperatura [°C] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 2,7 m per MV e DV	75
5.9	Velocità dell'aria [m/s] all'interno di un'aula elementare/media/superiore con un'altezza di 2,7 m per MV e DV	77
5.10	Vista dall'alto della velocità a 0,2 m dal pavimento con sistema DV in una scuola superiore con altezza di 2,7 m	78
5.11	CO ₂ relativa [ppm] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 3,5 m per MV e DV	80

5.12	Profilo verticale della differenza di concentrazione di CO ₂ [ppm] tra interno ed esterno in un'aula elementare/media/superiore di altezza 3,5m per MV e DV	81
5.13	Efficienza di ventilazione ACE in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza 3,5 m	82
5.14	Efficienza di rimozione della CO ₂ CRE in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza 3,5 m	82
5.15	Efficienza di rimozione della CO ₂ nella zona occupata (1.4 m) in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza 3,5 m	83
5.16	Temperatura [°C] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 3,5 m per MV e DV	84
5.17	Profilo verticale della temperatura [°C] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 3,5 m per MV e DV	85
5.18	Velocità dell'aria [m/s] all'interno di un'aula elementare/media/superiore con un'altezza di 3,5 m per MV e DV	86
5.19	Variazione della posizione della bocchetta di ripresa	89
5.20	Confronto punti di ristagno (CO ₂ relativa \geq 500 [ppm]) all'interno di un'aula (scuola media) altezza 3,5 m con DV al variare della posizione della ripresa dell'aria	91
5.21	Profili verticali CO ₂ relativa all'interno di un'aula (scuola superiore) al variare della portata di ventilazione con ventilazione a completa miscelazione MV e dislocamento DV	93
5.22	Variazione della CO ₂ relativa in funzione della portata di ventilazione per una aula alta 3,5m di una scuola superiore con DV e bocchetta di ripresa in POSIZIONE 2	94
5.23	Confronto tra MV e DV del risparmio energetico dovuto alla diminuzione della portata di ventilazione rispetto al D.M. 1975 per una classe di 175 m ³ in una scuola superiore	99

Elenco delle tabelle

2.1	ε^a per diverse strategie di ventilazione	30
2.2	Scala di sensazione a 7 punti	33
3.1	Coefficienti di ricambio d'aria nelle aule e negli ambienti scolastici da D.M. 1975 [19]	40
3.2	Portate di rinnovo negli ambienti scolastici [20]	41
3.3	Portate di ventilazione negli ambienti scolastici conformemente alla norma UNI EN 16798-1 [21]	43
3.4	Concentrazioni di CO ₂ all'interno del locale per 4 tipologie di categorie secondo UNI EN 16798-1 [21]	43
4.1	Dati geometrici di una "aula tipo"	52
4.2	Tabella riassuntiva casi studio	52
4.3	Numero di elementi e nodi per le 4 geometrie studiate ($M = 10^6$)	62
4.4	Proprietà dell'aria dalla libreria di Simscale	62
4.5	Portate in ingresso utilizzate	63
4.6	Valori medi del flusso termico sensibile [W · persona] dovuti alla presenza di persone	64
4.7	Valori medi della generazione di CO ₂ [L/s · persona] utilizzati nelle simulazioni	65
5.1	Simulazioni stazionarie per approccio prestazionale	67
5.2	Parametri registrati dalle simulazioni CFD per valutare l'efficienza di ventilazione nelle aule con altezza 2,7 m	71

5.3	Potenze termiche dovute alla presenza di persone, PC e dispersioni attraverso le superfici, E=elementari M=medie S=superiori	76
5.4	Parametri registrati dalle simulazioni CFD per valutare l'efficienza di ventilazione nelle aule con altezza 3,5 m	81
5.5	Confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni stazionarie per lo stesso tipo di aula, per due altezze diverse con le portate fornite dal D.M. 1975 .	88
5.6	Indici efficienza ventilazione a seconda della posizione della bocchetta in MV	90
5.7	Indici efficienza ventilazione a seconda della posizione della bocchetta in DV	91
5.8	Risultati ottenuti dalla variazione della portata di ventilazione all'interno di un'aula alta 3,5 m con MV ad uso di una scuola superiore con bocchetta di ripresa in POSIZIONE 2	92
5.9	Risultati ottenuti dalla variazione della portata di ventilazione all'interno di un'aula alta 3,5 m con DV ad uso di una scuola superiore con bocchetta di ripresa in POSIZIONE 2	93
5.10	Densità dell'aria in funzione della temperatura	97
5.11	Energia termica totale da fornire per due portate di ventilazione diverse durante il periodo invernale in una scuola superiore con DV	97
5.12	Energia elettrica da fornire a una Pompa Di Calore (COP 2,5) per due portate di ventilazione diverse durante il periodo invernale in una scuola superiore con DV	98
5.13	Energia elettrica da fornire ad ventilatore ($\epsilon_V = 0,7$) per due portate di ventilazione diverse durante il periodo invernale in una scuola superiore con DV	98
5.14	Energia elettrica totale per due portate di ventilazione diverse durante il periodo invernale in una scuola superiore con DV	99

Abbreviazioni

ACE	Air change efficiency
CAM	Criteri Ambientali Minimi
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO₂	Anidride carbonica
COV	Composto Organico Volatile
COP	Coefficient Of Performance
CRE	Contaminant Removal Effectiveness
DV	Ventilazione a dislocamento
IAQ	Qualità dell'aria interna
MV	Ventilazione a completa miscelazione
NPL	Piano di pressione neutra
PMV	Voto medio previsto
PPD	Percentuale di persone insoddisfatte
UTA	Unità trattamento aria
VMC	Ventilazione meccanica controllata

Introduzione

Gli edifici scolastici rivestono un ruolo sempre più importante nella società italiana, essendo i luoghi in cui le nuove generazioni si formano dal punto di vista istituzionale alla cultura e da quello sociale ai rapporti con i loro coetanei e con gli adulti esterni all'ambito familiare.

I bambini e gli studenti trascorrono una buona parte della loro vita nelle scuole quindi è necessario proteggerli e farli crescere nel migliore dei modi, fin da piccoli.

Pertanto le scuole devono essere sicure dal punto di vista strutturale e antisismico, energeticamente efficienti, salubri e confortevoli.

La qualità dell'aria negli ambienti chiusi è un requisito fondamentale [22] sia dal punto di vista degli inquinanti che della carica microbica per il mantenimento della buona salute [23] della popolazione scolastica e il miglioramento della produttività [24].

La recente pandemia ha rappresentato uno spunto di riflessione per l'analisi della qualità dell'aria all'interno delle scuole [25]. Gli istituti scolastici purtroppo sono sempre stati i grandi dimenticati su questo tema nonostante una legge del 1975 che stabilisce in maniera chiara quali dovrebbero essere le portate di ventilazione da effettuare dentro un ambiente scolastico per mantenerlo salubre.

Inoltre, i sempre più numerosi efficientamenti energetici hanno reso gli edifici sempre più ermetici e, in mancanza di un corretto ricambio d'aria, questo comporta un ulteriore peggioramento della qualità dell'aria interna con la conseguente "sindrome dell'edificio malato" *sick building syndrome*[26]. Se da un lato la progettazione di un edificio nuovo è perfettamente compatibile con la relativa dotazione di impianti di ventilazione in grado di soddisfare i requisiti normativi, dall'altro le portate richieste dall'elevato affollamento e le altezze dei locali risultano molto spesso in un vincolo architettonico rilevante nelle riqualificazioni; accade quindi che non sia sempre possibile realizzare impianti di ventilazione nel retrofit di edifici che possano garantire il ricambio necessario.

Pertanto se da un lato le nuove costruzioni consentono una certa libertà e flessibilità al progettista, dall'altro le riqualificazioni spesso richiedono al professionista una risposta con soluzioni non banali.

L'obiettivo di questa tesi è un'analisi prescrittiva che consiste nel verificare se la legge del 1975 possa fornire risultati soddisfacenti all'interno delle aule scolastiche. Per far

ciò, tramite simulazioni CFD, si andrà ad esaminare la legge mettendo a confronto due strategie diverse di ventilazione degli ambienti:

- Sistema decentralizzato per ventilazione a completa miscelazione, soluzione facile da integrare e che negli ultimi mesi dopo la pandemia ha preso molto piede per la ventilazione all'interno delle aule.
- Sistema di ventilazione a dislocamento, più "raffinato" e meno presente che però, come si vedrà nella tesi, rappresenta una valida alternativa al primo, garantendo un comfort e un risparmio energetico migliore.

Nella seconda parte di questo elaborato si eseguirà un'analisi di tipo prestazionale, studiando una riduzione delle portate di ventilazione, al fine di valutare il possibile risparmio energetico in un contesto di crisi energetica globale, mantenendo al contempo condizioni di qualità dell'aria interna accettabili.

Il presente elaborato è suddiviso in sei capitoli.

Nel capitolo 1 sono elencati i principali benefici che si traggono da un'ambiente scolastico salubre. In seguito verrà dimostrata la correlazione che intercorre tra la ventilazione e la qualità dell'aria ambiente. Infine, sono descritte le tre tipologie di ventilazione (naturale, meccanica e ibrida) al fine di valutarne i pro e i contro e i campi di applicabilità.

Il capitolo 2 descrive la ventilazione a dislocamento, mettendo in luce i fenomeni fisici che la caratterizzano e i principali metodi per il dimensionamento di un sistema simile. In seguito, si riassumono i principali indici per valutare l'efficienza di ventilazione e infine, un sintesi sul comfort termico globale.

Il capitolo 3 analizza attentamente la situazione normativa e gli inquinanti principali. Sono quindi riportate tutte le leggi e normative che regolamentano le portate di ventilazione negli ambienti scolastici e sono discussi i principali inquinanti indoor riportando le soglie limite e i problemi che possono causare.

Il capitolo 4 si occupa della definizione dei casi studio. Si illustrano dapprima le geometrie e i modelli utilizzati, in seguito, dopo una breve introduzione alla CFD, si descrivono tutti i passaggi e le impostazioni utilizzate per lo svolgimento delle analisi.

Nel capitolo 5 i risultati sono illustrati in tre sezioni:

- la prima consiste in un'analisi prescrittiva della legge;
- la seconda, la più breve, sarà uno studio di ottimizzazione dei sistemi di ventilazione;
- la terza, e ultima, si occuperà di un'analisi prestazionale ed energetica.

Infine, nel capitolo 6 sono tratte le conclusioni, riassumendo i risultati ottenuti ed evidenziando i limiti dello studio. Successivamente si analizzeranno i possibili sviluppi futuri.

Capitolo 1

Qualità dell'aria e ventilazione

1.1 Qualità dell'ambiente interna - IAQ

La IAQ è l'acronimo inglese di Indoor Air Quality, ovvero la qualità dell'aria in ambienti chiusi, un concetto che sta diventando sempre più importante nella gestione del rischio ambientale e che dovrebbe essere tenuto in considerazione anche in ambito scolastico. La qualità dell'aria interna si definisce accettabile quando in essa non sono presenti inquinanti noti in concentrazioni dannose e quando la maggioranza (almeno l'80%) delle persone esposte non esprime insoddisfazione. Negli ambienti interni sono presenti numerosi inquinanti, la maggiore difficoltà nel misurarne la concentrazione sta nel fatto che attualmente non sono disponibili strumenti di semplice uso che siano in grado di misurare le concentrazioni di tutti i contaminanti. Un'altra problematica importante è rappresentata dal fatto che misurare la concentrazione degli inquinanti può non essere sufficiente a valutare il rischio effettivo, perché possono insorgere effetti combinati che non sono direttamente misurabili. La norma UNI EN 16798-3:2018 [27] stabilisce che in ambienti non residenziali, in cui gli occupanti costituiscono la sorgente di inquinamento principale, l'anidride carbonica CO₂ è l'inquinante di riferimento e quindi la sua misurazione permette di fare stime sull'efficacia dell'impianto di ventilazione. La stessa norma poi continua indicando che le misure devono essere fatte in inverno a livello della testa e nelle condizioni peggiori possibili.

La riduzione dei contaminanti negli edifici, nonché il miglioramento della qualità dell'aria interna, possono essere realizzate per mezzo di due strategie:

- la riduzione degli inquinanti provenienti dall'ambiente esterno;
- la riduzione degli inquinanti interni.

Gli inquinanti prodotti dalle sorgenti interne possono essere ridotti:

- diminuendo le sorgenti inquinanti. La scelta dei materiali da costruzione e di quelli costituenti gli arredi e le apparecchiature elettriche può essere una strategia efficace per ridurre le concentrazioni di inquinanti e quindi migliorare la qualità dell'aria interna;
- rimuovendo gli inquinanti alla fonte. Ad esempio nelle cucine solitamente è predisposta un'estrazione direttamente nel luogo di produzione dell'inquinante;
- diluendo gli inquinanti con un'efficace strategia di ventilazione. Diversi enti hanno normato le portate di ventilazione necessarie al soddisfacimento delle condizioni interne.

Mantenere una buona IAQ all'interno di un ambiente chiuso è fondamentale, questa oltre a ridurre la percezione di cattivi odori (aria "viziata"), aumenta la produttività e la salute degli occupanti.

1.1.1 Percezione della qualità dell'aria

Sebbene le portate di ventilazione siano normate da precise leggi e normative (vedi capitolo 3) e ricavate sulla base di dati oggettivi, come ad esempio la quantità di inquinante presente all'interno della stanza, un aspetto importante, da non trascurare, è quello soggettivo, ovvero la percezione della IAQ da parte degli occupanti.

Una possibilità per valutare la qualità dell'aria interna nel caso in cui le persone costituiscono la principale causa di inquinamento potrebbe essere la misura soggettiva, che consiste nella valutazione degli odori attraverso la percezione olfattiva dell'aria.

Fanger (1988) propone una nuova metodologia di analisi partendo dalla considerazione che i sensi umani possono, in determinate condizioni, essere più affidabili delle analisi chimiche. Da questa ipotesi si è sviluppato un metodo che considera soggettivamente la percezione della qualità dell'aria partendo però da valutazioni oggettive sulle sorgenti inquinanti. Per far ciò sono state introdotte due unità di misura l'**olf** e il **decipol**.

L'**olf** è l'unità di carico di inquinante emessa da una persona in condizioni di benessere termico e con normali abitudini igieniche (0,7 docce al giorno). Ogni sorgente inquinante viene quindi espressa tramite la potenza della sorgente equivalente, definita come il numero di persone standard (espresse in **olf**) necessarie per causare la stessa insoddisfazione provocata dalla sorgente inquinante reale.

Il **decipol** è l'unità di misura del carico inquinante percepito quando la portata di ventilazione nell'ambiente è di 10 L/s e il carico inquinante è pari ad 1 **olf**.

$$1 \text{ decipol} = 0.1 \text{ olf} / (l/s) \quad (1.1)$$

La qualità percepita dell'aria viene quindi definita come quella concentrazione di bioeffluenti umani che causerebbe la stessa insoddisfazione provocata dall'inquinamento reale. Va tuttavia precisato che il decipol esprime solo la qualità dell'aria percepita dagli esseri umani, non i possibili rischi per la salute.

In figura 1.1 (Fanger, 1988) è raffigurata la relazione tra la percentuale di persone insoddisfatte e la qualità percepita dell'aria in decipol.

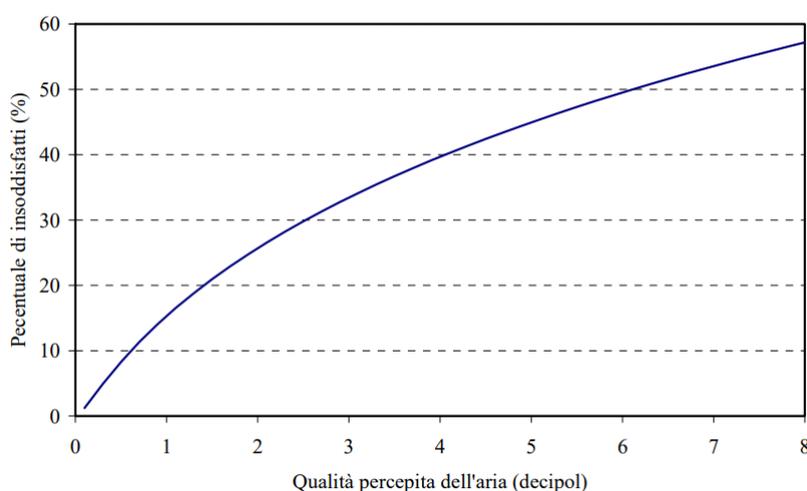


Figura 1.1 Percentuale di insoddisfatti in funzione della qualità percepita dell'aria [1]

Si precisa che i livelli di qualità percepita dell'aria riportati si riferiscono alla sensazione iniziale provata dai visitatori di un ambiente: è importante infatti cogliere la prima impressione, poiché in pochi minuti l'organismo si adatta ai bioeffluenti umani.

1.1.2 Salute

Diversi studi a livello mondiale dimostrano che la IAQ influenza la salute e le prestazioni dei bambini. I bambini e gli studenti passano infatti una buona parte della loro vita nelle scuole, e c'è bisogno di proteggerli e farli crescere nel migliore dei modi, fin da piccoli. I polmoni dei bambini, ancora in via di sviluppo, sono particolarmente vulnerabili all'inquinamento dell'aria interna. Questo perché i loro corpi stanno crescendo attivamente e respirano volumi di aria più elevati degli adulti rispetto al loro peso corporeo.

Negli ultimi decenni si è registrato un aumento dell'asma bronchiale fra i bambini in età scolare nelle scuole europee [23].

Nello studio "Health Effect of School Environment" (HESE, 2006) [28] sono state monitorate 21 scuole e quindi la salute di oltre 600 studenti sparsi per l'Europa. I risultati hanno evidenziato una correlazione tra l'esposizione a CO₂, PM e muffe con maggiori rischi di tosse secca notturna, rinite e allergie. Per quanto riguarda invece l'ipertensione nei

bambini/infantile, si è notato che può essere associata ad un'eccessiva esposizione ai PM, i quali possono provocare squilibrio del sistema nervoso autonomo e disfunzione vascolare arteriosa [29].

Inoltre, gli studenti esposti a lungo termine a livelli elevati di inquinamento dell'aria interna possono presentare rischi maggiori di sviluppare problemi di salute mentale, come ansia e depressione.

Prevalence of children with chronic respiratory symptoms in well or poorly ventilated classrooms

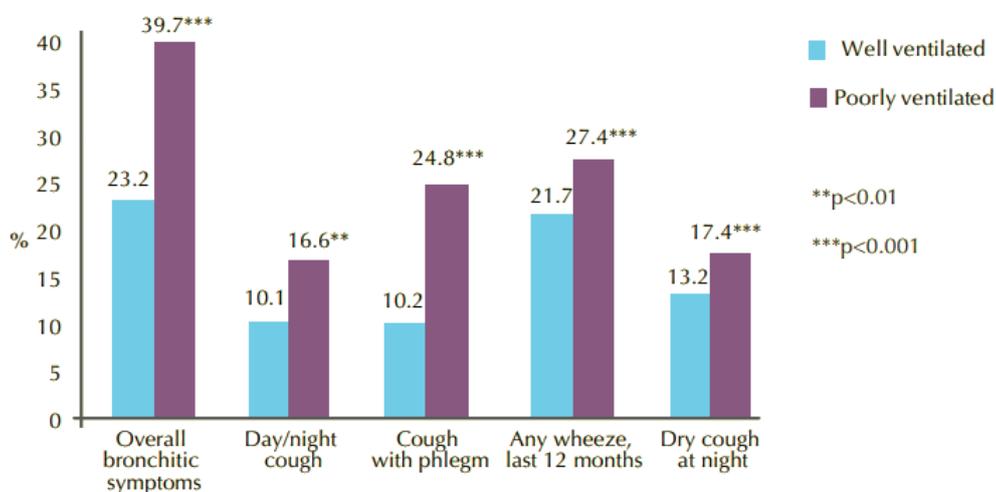


Figura 1.2 Percentuale di bambini con malattie respiratorie croniche in classi ben ventilate e poco ventilate [2]

1.1.3 Produttività

La qualità dell'aria interna ha un impatto significativo sulla produttività e sulla salute degli studenti. La letteratura scientifica fornisce una vasta gamma di risultati che dimostrano come la qualità dell'aria interna influisca sulle prestazioni scolastiche, sul rendimento cognitivo e sulla salute fisica e mentale degli studenti. I soggetti pensano in modo più chiaro e si comportano meglio in ambienti più salubri, quindi a bassa concentrazione di anidride carbonica, mentre alti livelli di CO₂ denotano un rallentamento dei riflessi e compromettono la capacità decisionale.

Uno studio statunitense, [24] condotto su classi di quinta elementare di 100 scuole, ha utilizzato come parametro di valutazione il rendimento degli studenti nei test accademici. Ha dimostrato che esiste una correlazione lineare tra gli studenti che superavano il test e il

tasso di ventilazione. Per ogni aumento di 1 L/s per persona del tasso di ventilazione, si è registrato un aumento del 2,9% di studenti che hanno superato il test di matematica e del 2,7% di studenti che hanno superato il test di letteratura.

Allo stesso modo alcuni ricercatori in Danimarca hanno scoperto che aumentare la ventilazione nelle aule ha portato ad un aumento statisticamente significativo delle prestazioni nelle attività numeriche e linguistiche [30].

1.1.4 COVID-19

Nel 2020, la diffusione globale del virus Covid-19 ha reso i progettisti e i gestori di edifici più che mai consapevoli dell'importanza del loro ruolo in relazione alla salute degli occupanti. La ventilazione meccanica controllata è un ottimo alleato perché in grado di ridurre la concentrazioni di particelle virali con un'efficacia maggiore rispetto alla ventilazione naturale. Infatti il virus SARS-CoV-2 si diffonde attraverso particelle di aerosol, ovvero particelle molto piccole che contengono il virus e che possono rimanere sospese nell'aria per ore. Se l'aria in un ambiente chiuso non viene adeguatamente ventilata, la concentrazione di tali particelle virali aumenta, incrementando il rischio di infezione per le persone presenti nell'ambiente. Una buona ventilazione meccanica, invece, aiuta a diluire la concentrazione di tali particelle, riducendo il rischio di infezione. Negli ultimi anni si stanno sviluppando metodi alternativi per la ventilazione degli ambienti chiusi e molto affollati. Uno di questi metodi è la *displacement ventilation* DV (ventilazione a dislocamento), la quale verrà poi approfondita nel capitolo 2. In figura 1.3 viene mostrato che la DV si presta meglio alla rimozione degli inquinanti rispetto ad altri sistemi tradizionali di ventilazione che tendono a miscelare l'aria pulita con quella "viziata" dalle persone.

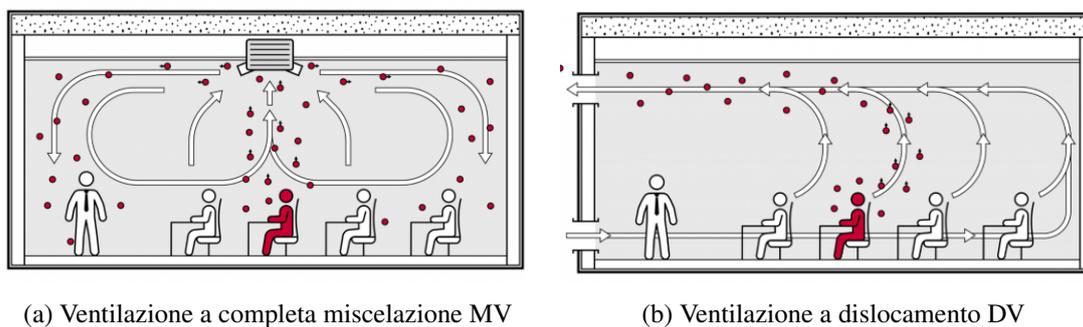


Figura 1.3 Confronto tra ventilazione a completa miscelazione e a dislocamento [3]

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ricorda come la ventilazione, naturale o meccanica, è parte strategica degli interventi di prevenzione e controllo della riduzione del rischio di trasmissione COVID-19. Un impianto di VMC svolge quindi un ruolo

complementare nel ridurre la trasmissione negli spazi interni aumentando la velocità e l'efficienza di ricambio dell'aria (figura 1.4).

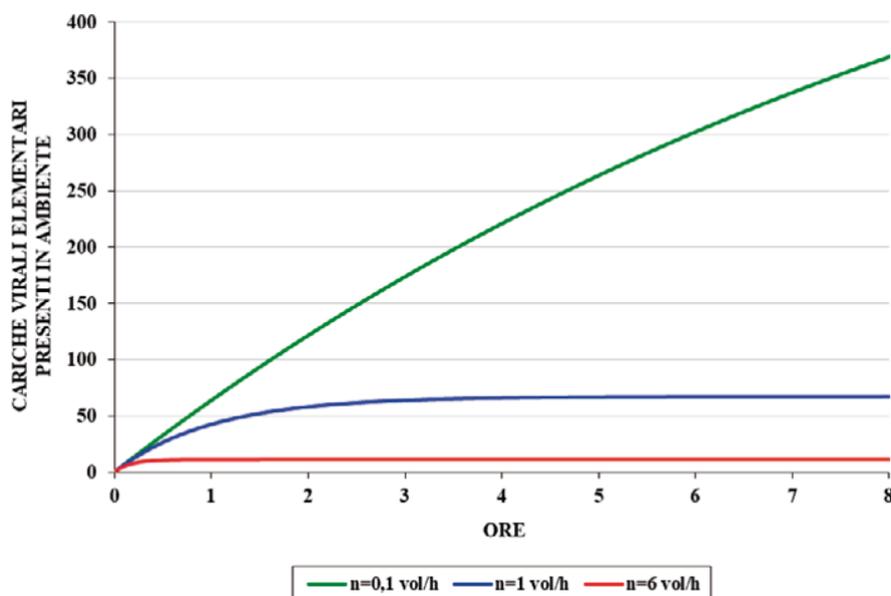


Figura 1.4 Andamento nel tempo delle cariche virali elementari presenti nell'ambiente per ogni persona infetta, per diversi valori del tasso di ventilazione [4]

1.2 Ventilazione

Per ventilazione di un ambiente si intende il processo di movimento dell'aria all'interno di uno spazio chiuso o confinato, al fine di rimuovere l'aria stagnante e sostituirla con aria fresca dall'esterno. Questo procedimento aiuta a migliorare la IAQ così da garantire un ambiente salubre per le persone che lo occupano.

Difatti esiste un legame fisico tra la ventilazione e la IAQ. Questo legame si ricava dall'equazione di continuità all'interno di una stanza [31] secondo la quale la variazione di quantità di inquinanti nell'ambiente dovrà essere pari alla differenza tra la quantità introdotte e le quantità di inquinanti fuoriusciti dall'ambiente.

$$V \frac{dc}{dt} = g(t) + Q(t)c_{out} - Q(t)c(t) \quad (1.2)$$

in cui:

V= volume dell'ambiente [m³]

c= concentrazione dell'inquinante monitorato [ppm]

g= tasso di emissione dell'inquinante [mL/s]

Q= portata d'aria di ventilazione [m³/s]

c_{out}= concentrazione dell'inquinante all'esterno [ppm]

La portata di ventilazione può così definita come:

$$Q(t) = \frac{g(t) - V \frac{dc}{dt}}{c(t) - c_{out}} \quad (1.3)$$

Negli ambienti scolastici le principali fonti di inquinanti sono legate alla presenza umana, per cui in genere, in questo tipo di ambienti si utilizza come inquinante di riferimento la CO₂ dato che la sua concentrazione è un buon indicatore della IAQ poiché il suo livello nell'aria aumenta in modo proporzionale rispetto a tutte le altre sostanze.

Nel caso di ambienti densamente affollati, la CO₂ è generata all'interno del volume con un tasso di emissione g che dipende dal genere, dall'età e dalle attività svolte dalle persone. L'andamento della concentrazione di gas nell'ambiente che ne risulta è quello di figura 1.5.

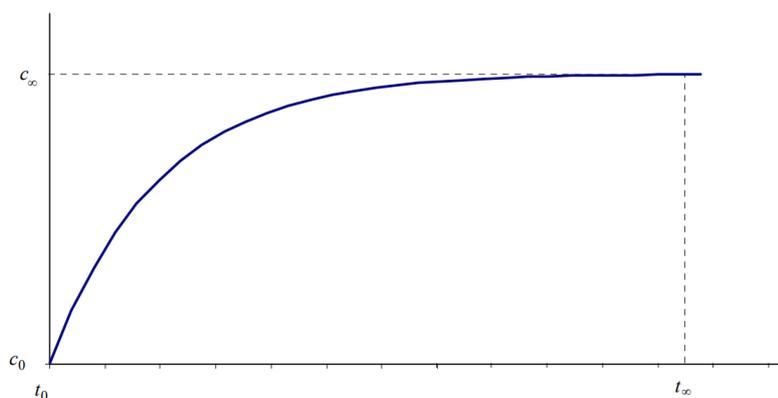


Figura 1.5 Andamento temporale della concentrazione di CO₂ in un locale dove la fonte di inquinamento principale sono le persone [1]

Nel caso in cui V , Q , g e c_{out} siano costanti, integrando tra un istante iniziale $t=0$, in cui la concentrazione è pari a $c_0 = c_{out}$ ed un generico istante t la 1.2 diventa:

$$c(t) = c_{\infty} + \left(c_0 - c_{\infty} \right) e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (1.4)$$

dove la concentrazione di equilibrio c_{∞} , rappresenta il valore in condizioni di regime permanente, cioè la concentrazione che si ottiene in condizioni stazionarie. Questo valore si ricava uguagliando a zero la derivata rispetto al tempo della concentrazione, ottenendo la relazione:

$$c_{\infty} = c_{out} + \frac{g}{Q} \quad (1.5)$$

Risulta chiaro dunque come all'aumentare della portata di ventilazione Q , c_{∞} diminuisca e di conseguenza fa diminuire la concentrazione dell'inquinante nel tempo $c(t)$.

Esistono diverse soluzioni per la ventilazione di un ambiente e tutte si possono raggruppare in queste 3 macro categorie:

1. Ventilazione naturale
2. Ventilazione meccanica
3. Ventilazione mista o ibrida

1.2.1 Ventilazione naturale

Si tratta ad oggi della strategia più diffusa per il ricambio d'aria nelle scuole. Il meccanismo di ventilazione è dato dall'aria che è movimentata da forze naturali associate a gradienti di pressione e di temperatura, questa entra ed abbandona l'edificio attraverso le aperture presenti, come porte e finestre nonché attraverso le infiltrazioni. Le aperture possono essere controllate manualmente (areazione) oppure tramite azionamenti automatici.

La differenza di temperatura tra interno ed esterno dell'involucro si traduce in una differenza di densità dell'aria la quale, a sua volta, in funzione dell'andamento dei gradienti di pressione con l'altezza, dà luogo ad una differenza di pressione detta *effetto camino*. In presenza di due aperture uguali, il punto in cui i due gradienti di pressione si intersecano ($\Delta P = 0$), indicato in letteratura come *natural pressure plan* (NPL), è collocato esattamente a metà tra le stesse. Nel caso in cui invece uno dei due serramenti è più grande, per principio di conservazione della massa il ΔP che insiste su di esso sarà minore rispetto a quello che agisce sull'apertura più piccola, facendo sì che il NPL si trovi più in basso rispetto al caso precedente.

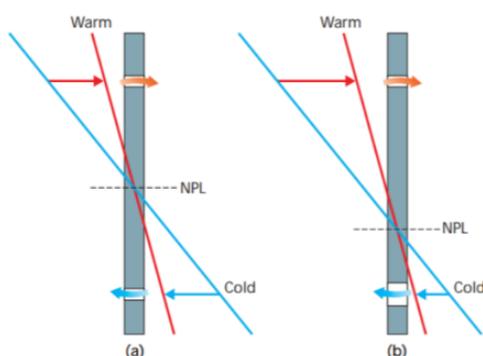


Figura 1.6 Altezza del NPL per due aperture uguali (a) e diverse (b) [5]

Ne deriva che, con una temperatura interna superiore a quella esterna, sotto il NPL l'aria si muove dal lato freddo al lato caldo, ovvero penetra all'interno dell'edificio; viceversa, sopra il NPL l'aria si sposta dal lato caldo al lato freddo, ovvero viene espulsa verso

l'esterno [5].

La geometria e la posizione dei serramenti condizionano la distribuzione della portata di rinnovo all'interno degli ambienti (figura 1.7) e concorrono al rischio di correnti fredde, alle quali viene infatti imputata la scarsa frequenza di areazione effettuata dagli occupanti durante i mesi invernali. Tale condizione assume ancora più importanza nel caso in cui le aule, come spesso accade, presentino i serramenti localizzati su un'unica facciata [5].

A seconda di come i serramenti sono posizionati nella stanza, vi possono essere variazioni rispetto alla circolazione dei flussi di aria all'interno della stanza e alle temperature percepite localmente dagli studenti, mentre complessivamente non si registrano cambiamenti significativi della portata di rinnovo, nonché del livello di IAQ perseguito.

In inverno il getto d'aria assume l'andamento (1), ovvero scivola lungo il muro fino a raggiungere il pavimento, incrementando il rischio di correnti fredde e discomfort termico. Per ovviare a questo problema i radiatori vengono solitamente installati sotto alle finestre. Man mano che si va verso il periodo estivo, le temperature esterne sono più alte e il profilo di velocità diventa più uniforme con la conseguenza di un minor rischio di correnti fastidiose.

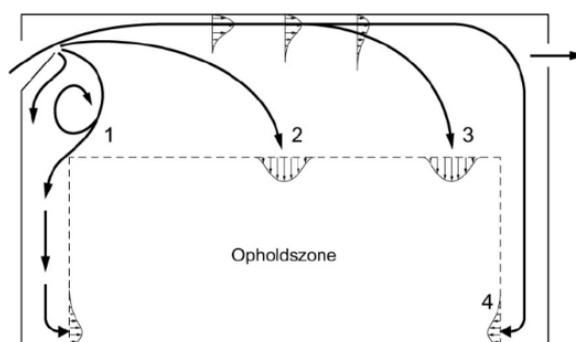


Figura 1.7 Distribuzione dell'aria in una stanza con aperture superiori a vasistas in diverse condizioni [5]

Al fine di massimizzare l'efficienza di ventilazione naturale è opportuno che il progettista valuti accuratamente la tipologia di serramenti da installare, nonché dell'andamento dei parametri ambientali esterni come temperatura, velocità e direzione del vento in corrispondenza del sito di interesse.

1.2.2 Ventilazione meccanica

La ventilazione meccanica è costituita da sistemi di ventilazione che utilizzano ventilatori meccanici per regolare il flusso dell'aria in un edificio. Viene indicata anche con l'acronimo VMC (ventilazione meccanica controllata), e può essere di due tipi in base ai processi che avvengono:

- sistemi *passivi*: tutti quegli impianti di ventilazione che realizzano un rinnovo dell'aria senza che questa venga trattata, ma sottoponendola semplicemente ad un processo di filtrazione e recupero termico; la VMC quindi si occupa solo del ricambio dell'aria.
- sistemi *attivi*: impianti di ventilazione in grado di trattare l'aria di mandata tramite batterie di riscaldamento/raffrescamento, umidificatori e/o deumidificatori installati nella unità trattamento aria (UTA). Questi sistemi trattano più aria di quelli passivi perché oltre alla qualità dell'aria si occupano di mantenere adatte le condizioni interne (temperatura umidità).

Tali sistemi si dividono a loro volta in due macro-insiemi:

1. **Sistemi centralizzati o canalizzati**: associati a un'ottima efficienza di ventilazione, trovano spazio soprattutto nelle nuove costruzioni, in quanto gli elevati ingombri e i costi di investimento ne limitano spesso l'applicazione all'esistente (figura 1.8). Distribuiscono la portata d'aria nei vari ambienti attraverso una serie di condotte di mandata e di ripresa.

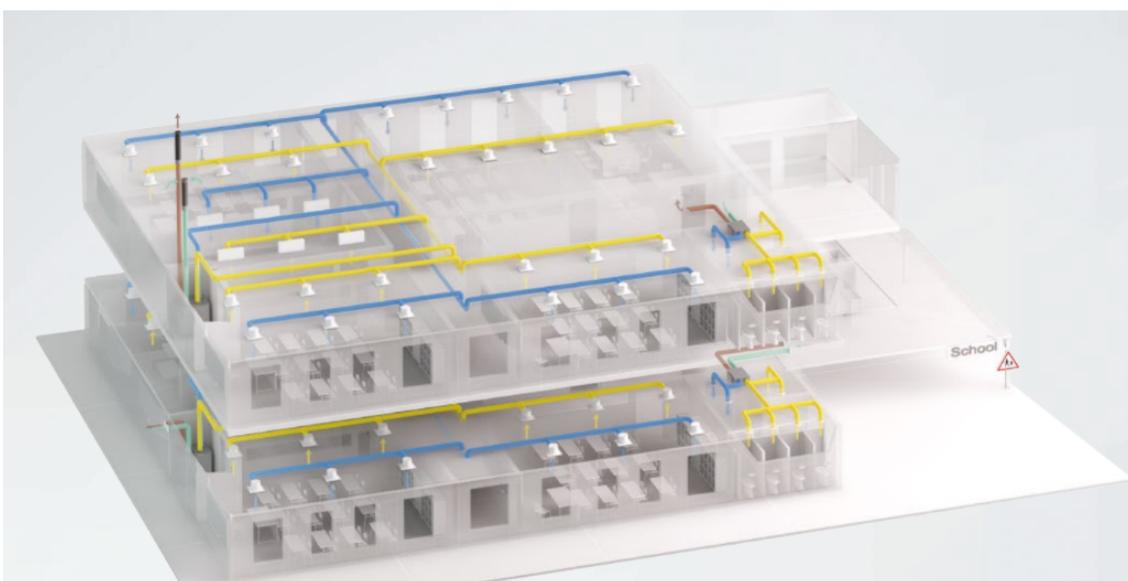


Figura 1.8 Impianto di ventilazione centralizzato, una sola macchina per tutto l'edificio [6]

2. **Sistemi decentralizzati o non canalizzati:** consistono in macchine che soddisfano i ricambi d'aria di singoli ambienti tramite immissione e/o estrazione puntuale senza l'impiego di canali di distribuzione. Sono molto facili da installare soprattutto negli edifici esistenti durante le fasi di ristrutturazione.

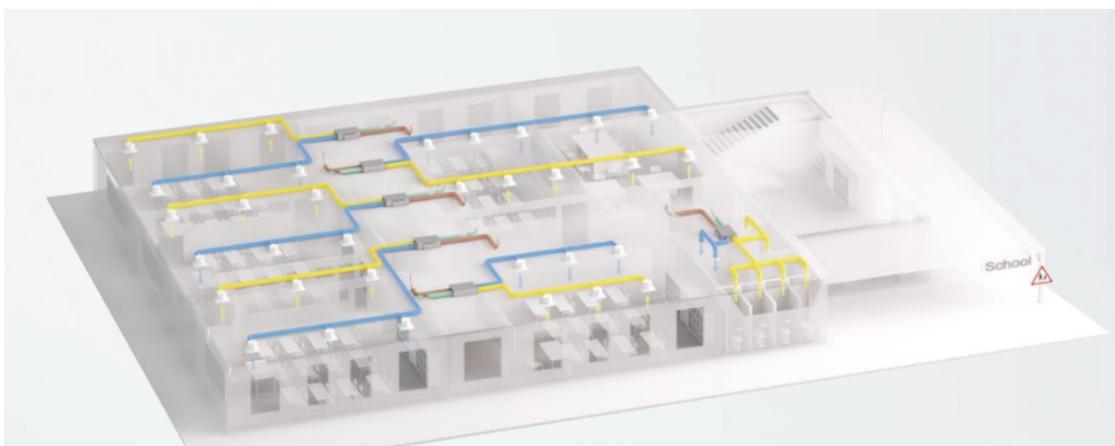


Figura 1.9 Impianto di ventilazione decentralizzato, una macchina per ogni ambiente [6]

Le configurazioni impiantistiche sono molteplici e comprendono l'installazione dei macchinari a parete, a soffitto oppure integrati negli infissi. Negli ultimi anni sul mercato stanno comparando sempre più soluzioni di questo tipo dedicate alle aule scolastiche, ovvero unità di ventilazione meccanica a doppio flusso con elevata filtrazione dell'aria e recupero del calore sensibile e latente. Tali macchine inoltre si prestano molto bene ad essere adattate negli spazi già esistenti senza la necessità di opere edili onerose.

Tuttavia una grossa criticità delle unità decentralizzate consiste nell'efficienza di distribuzione dell'aria per evitare la *corto-circuitazione* dell'aria fresca e dell'aria esausta. In questo elaborato si porrà particolare cura a questo aspetto e si andrà a dimostrare tramite analisi stazionarie CFD come evitare questo fenomeno.

Durante la fase di progettazione è necessario porre particolare cura al posizionamento delle bocchette di presa dell'aria esterna in quanto queste ricoprono un ruolo chiave nella definizione del carico inquinante a cui il sistema di filtrazione è sottoposto e quindi all'IAQ interna. Nessuna apertura dovrebbe essere posizionata su una facciata esposta a una sorgente inquinante, come una fabbrica o una strada trafficata; è buona norma pertanto posizionare la bocchetta a una altezza al terreno di almeno 3 metri e lontano dalla bocchetta di espulsione per evitare cortocircuiti. Tra le varie tecnologie utilizzate in questi impianti, di seguito verranno approfondite i recuperatori di calore, i filtri e i ventilatori con le rispettive logiche di controllo.

Recuperatore di calore

Il recuperatore di calore è uno scambiatori di calore a recupero che permette di trasferire l'energia termica della portata di aria esausta in uscita a quella dell'aria fresca in ingresso. Il rapporto tra la potenza termica effettivamente scambiata \dot{Q} e quella massima scambiabile \dot{Q}_{max} prende il nome di **efficienza del recuperatore** ε e varia in funzione della tecnologia utilizzata, della temperatura dei due flussi e della direzione in cui essi scorrono.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (1.6)$$

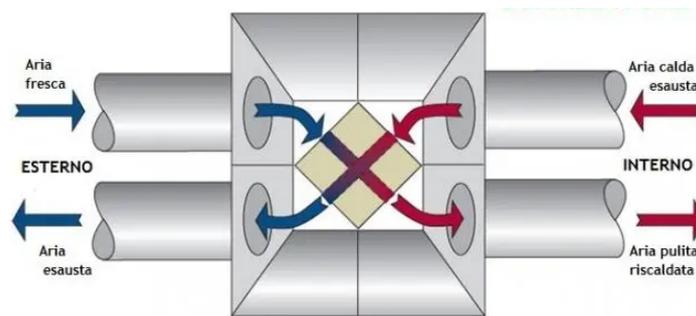


Figura 1.10 Recuperatore di calore a flussi incrociati

Per quanto riguarda la direzione, a parità di condizioni di esercizio, gli scambiatori nei quali i due flussi scorrono in maniera opposta (scambiatori controcorrente) sono i più efficienti rispetto a quelli a flussi paralleli (equicorrenti).

In aggiunta un aspetto molto importante riguarda le perdite di carico le quali dovrebbero essere il più contenute possibili per non andare a penalizzare il consumo energetico del ventilatore. Dato che le perdite di carico sono proporzionali alla velocità, un metodo per ridurle a parità di efficienza di scambio potrebbe essere quello di diminuire la velocità del fluido aumentando le superfici di scambio. Questa procedura però porta ad avere macchine sempre più grandi e costose.

In figura 1.11 è mostrata una tabella riassuntiva delle varie tecnologie di recuperatori di calore con le loro caratteristiche. Alcuni scambiatori ad alta efficienza sono in grado, tramite membrane, di trasferire al fluido in ingresso, oltre che al calore sensibile (calore che causa una variazione di temperatura in un oggetto), anche quello latente (calore che causa una trasformazione di stato senza variazioni di temperatura). Alcuni recuperatori sono dotati di una valvola di *by-pass* che durante le stagioni più calde può essere attivata per disattivare lo scambiatore termico e sfruttare le potenzialità del *free cooling* estivo riducendo così i carichi interni da smaltire durante la stagione di raffreddamento.

Una criticità rilevante del recuperatore di calore consiste nell'ermeticità dello scambiatore

il quale deve evitare che tra l'aria in ingresso e quella in uscita avvengano scambi di massa e quindi fenomeni di contaminazione.

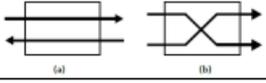
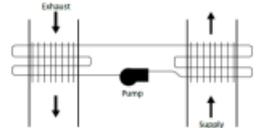
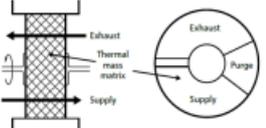
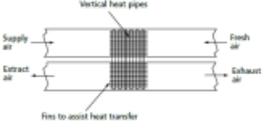
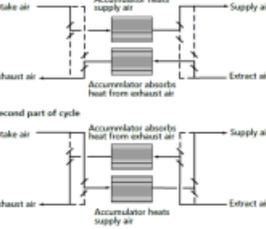
Tipologia	Efficienza [%]	Perdite di fuga [%]	Perdite di carico [Pa]	Metodi di controllo	Note
Scambiatore a piastre in controcorrente (a) o a flussi incrociati (b) 	< 90 (a) < 70 (b) sensibile	0 - 5	25 - 370	Bypass	Non ci sono parti in movimento. Pulizia molto semplice
Scambiatore con circuito intermedio 	50 - 70 sensibile	0	100 - 500	Bypass e pompa del circuito secondario	Il circuito secondario con acqua glicolata dà molta flessibilità. L'aria esausta è sempre separata da quella fresca.
Scambiatore rotativo 	65 - 90 sensibile + latente	1 - 10	100 - 170	Bypass e velocità di rotazione della ruota	Scambio di calore latente e sensibile. Perdite di fuga importanti e contaminazione dell'aria fresca. Pulizia difficile.
Scambiatore a tubi di calore 	50 - 70 sensibile	0	100 - 500	Angolo di inclinazione del tubo di calore	Elevati costi d'investimento.
Scambiatore con accumulatore 	85 - 95 sensibile	1 - 5	70 - 300	Frequenza di commutazione dei circuiti	Elevati costi d'investimento ma elevata efficienza. Autopulizia dei canali ma possibile contaminazione dell'aria in ingresso.

Figura 1.11 Tecnologie di recupero termico [5]

Filtro

I filtri delle unità di ventilazione meccanica (VMC) sono dispositivi progettati per rimuovere le particelle e gli agenti contaminanti dall'aria che circola all'interno degli ambienti domestici o lavorativi. Questi sono solitamente installati nella sezione di aspirazione

dell'unità di ventilazione meccanica, tramite la quale l'aria esterna entra nell'edificio. esistono diversi tipi di filtri che possono essere utilizzati nelle VMC ma, in generale, i filtri sono classificati in base al loro grado di filtrazione, ovvero la capacità di filtrare le particelle in aria di dimensioni diverse. La scelta di un filtro performante si ripercuote negativamente sul consumo energetico perché questi introducono grandi perdite di carico alle quali deve far fronte poi il ventilatore. I filtri quindi hanno un impatto rilevante sui costi annuali di esercizio. Pertanto, a parità di efficienza, la scelta del filtro dovrebbe avvenire sulla base della caduta di pressione iniziale e finale dichiarata dal produttore, la quale deve essere il minore possibile [5].

Al fine di ottimizzare il processo di filtrazione si dovrebbero predisporre almeno due stadi di filtrazione, uno posto a monte e l'altro a valle dell'unità di trattamento aria. Fondamentale eliminare vari giochi tra filtri e componenti del sistema per evitare che l'aria possa bypassare il sistema filtrante.

Classe	ePM1 $0.3 \leq x \leq 1$	ePM2.5 $0.3 \leq x \leq 2.5$	ePM10 $0.3 \leq x \leq 10$	Valore di riferimento	Δp finale [Pa]
ISO Coarse	-	-	< 50%	Arrestanza gravimetrica iniziale	200
ISO ePM10	-	-	$\geq 50\%$	ePM10	300
ISO ePM2.5	-	$\geq 50\%$	-	ePM2.5	300
ISO ePM1	$\geq 50\%$	-	-	ePM1	300

Figura 1.12 Classificazione dei filtri [7]

Come si evince dalla figura 1.12, i filtri vengono classificati dalla normativa UNI EN ISO 16890 [7] in base alla loro capacità di catturare polveri grossolane (*coarse*), PM10, PM2.5 e PM1.

Ventilatore e logiche di regolazione

Il ventilatore è il componente dell'impianto al quale si imputa gran parte del costo di esercizio dell'impianto VMC, quindi è importante porre grande cura nella scelta della macchina adatta. Negli ultimi anni stanno prendendo sempre più piede i ventilatori a velocità variabile che rispondono efficacemente alla richiesta di ventilazione dei vari ambienti. In questo modo i ventilatori possono interfacciarsi con diversi sistemi di controllo come sensori di presenza e comportare ad un risparmio energetico.

Per spazi ad occupazione variabile (come le aule scolastiche), il controllo della ventilazione è essenziale per ottenere lo stesso target di qualità dell'aria ma con un considerevole risparmio energetico. Esistono diversi metodi per regolare le portate d'aria, i quali possono agire sull'introduzione di perdite di carico nell'impianto (tramite serrande) oppure direttamente

sul ventilatore (variazione numero di giri, cambio calettamento delle pale). I controlli che agiscono direttamente sul ventilatore portano a un risparmio energetico migliore perché la portata viene regolata agendo direttamente sulla potenza assorbita dal ventilatore, senza dissipazioni di energie. Il controllo può essere eseguito tramite un sensore che misura la CO₂, ovvero un parametro proporzionale al numero di persone presenti nell'aula. Questo tipo di controllo è il metodo più efficiente per regolare il ricambio d'aria negli edifici scolastici e può seguire 3 strategie [5]:

- **controllo di set-point:** la portata di ingresso viene controllata attraverso l'apertura/chiusura della valvola di immissione o mediante un funzionamento on/off del ventilatore. Questo accade quando la concentrazione di CO₂ misurata dal sensore supera un livello massimo di setpoint, a questo punto la portata di aria di rinnovo fluisce nel locale fino a che non si raggiunge il valore minimo di setpoint. Il valore massimo e minimo non devono essere né troppo vicini né lontani per evitare nel primo caso accensioni/spengimenti che danneggerebbero il ventilatore e nel secondo caso tempi troppo lunghi di intervento.
- **Controllo proporzionale:** consiste nel controllo progressivo della portata di immissione attraverso l'aumento della CO₂ rispetto all'esterno. Anche in questo caso sono fissati degli intervalli estremi di regolazione. All'interno di questo intervallo, il sistema di controllo lavora per punti di equilibrio, agendo sull'angolo di apertura della valvola di immissione o sulla velocità del ventilatore a seconda della CO₂ rilevata. In figura 1.13 è raffigurato uno schema semplificato di funzionamento.

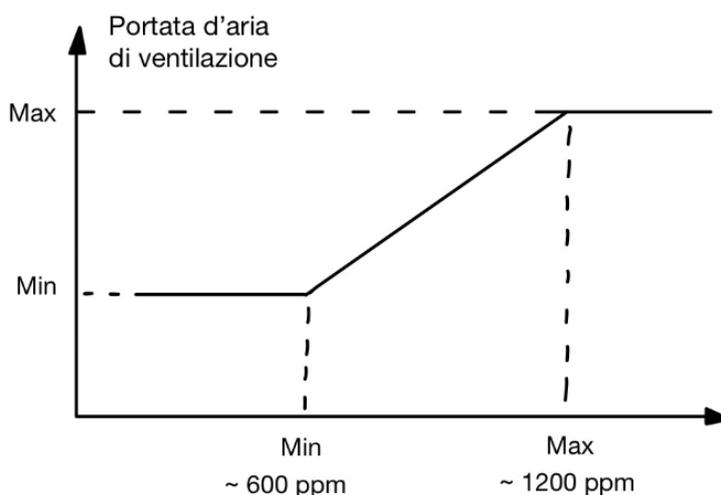


Figura 1.13 Logica di regolazione della portata proporzionale

- **Controllo esponenziale:** presenta una logica simile al controllo proporzionale ma con una curva diversa. È molto utile nei grandi spazi nei quali l'incidenza

della portata di ventilazione sull'andamento della CO₂ è inferiore rispetto a locali più piccoli. Ciò comporta che la curva di regolazione debba avere una maggiore sensibilità alle variazioni della CO₂ per un elevato numero di punti di lavoro.

Tuttavia il controllo della ventilazione tramite il monitoraggio della CO₂ non è immediato perché è fortemente dipendente dai fenomeni diffusivi del contaminante nell'aria, studi hanno dimostrato che a fronte di un aumento delle persone la CO₂ aumenta con un ritardo temporale di circa 20 minuti [32]. Al fine di ottenere un sistema più rapido è possibile integrare il sensore a CO₂ con un altro specifico per l'occupazione ad infrarossi in grado di rilevare in un tempo breve il numero di occupanti.

Particolare attenzione va posta al posizionamento dei sensori all'interno degli spazi occupati affinché le letture provenienti dagli stessi siano rappresentative delle condizioni interne. La posizione dipende dal tipo di strategia di ventilazione adottata per il locale ma in generale si raccomanda di collocare il sensore su un muro perimetrale all'altezza di 1,2m in un punto riparato dalla respirazione delle persone.

Durante la completa assenza di persone in un locale è comunque necessario garantire una portata di "lavaggio"(20-30% della portata nominale) per smaltire sostanze emesse dai materiali degli arredi o dai prodotti di pulizia.

1.2.3 Ventilazione mista o ibrida

Si definisce ventilazione mista o ibrida un sistema di ventilazione che combina elementi della ventilazione naturale e della ventilazione meccanica al fine di garantire un adeguato ricambio dell'aria e un controllo preciso dell'ambiente interno.

In un sistema di ventilazione ibrida, l'aria fresca viene introdotta nell'edificio attraverso aperture naturali, come finestre o aperture a parete, sfruttando la forza del vento e la differenza di temperatura tra interno e esterno. Questo processo di ventilazione naturale viene poi integrato con un sistema di ventilazione meccanica, che utilizza ventilatori, filtri e altre componenti per garantire un'adeguata circolazione dell'aria e un controllo preciso della qualità dell'aria interna. Questo avviene per mezzo di opportuni algoritmi di controllo, in grado di definire quale sistema di ventilazione deve intervenire al fine di minimizzare i consumi energetici e di preservare una buona IAQ.

In questo tipo di impianti è necessario soddisfare il dimensionamento sia per l'areazione naturale che per la ventilazione meccanica e pertanto la sua realizzazione è tutt'altro che banale. In un sistema di ventilazione ibrida, la ventilazione naturale viene utilizzata quando le condizioni esterne lo permettono, come durante le ore diurne o quando la temperatura esterna è inferiore di quella interna. Quando le condizioni esterne non sono favorevoli alla ventilazione naturale, come durante le ore notturne o quando la temperatura esterna è troppo calda, il sistema di ventilazione meccanica prende il controllo per garantire un

adeguato ricambio dell'aria.

Gli impianti ibridi possono essere distinti in tre tipologie principali [5]:

- **sistemi distinti di ventilazione meccanica e naturale:** si tratta di due impianti completamente autonomi, uno dedicato all'areazione naturale e l'altro alla ventilazione meccanica. Questo tipo di impianto è associato a condizioni dove l'areazione naturale è utilizzata nelle stagioni intermedie, mentre la ventilazione meccanica durante periodi molto caldi o freddi.
- **Ventilazione naturale assistita:** si basa su un sistema di areazione naturale all'interno del quale sono presenti uno o più ventilatori di immissione e/o estrazione. Questi hanno lo scopo di forzare il ricambio dell'aria quando le forze naturali esterne non sono in grado di assicurare la portata di progetto.
- **Ventilazione meccanica assistita dal vento e dalla stratificazione termica:** impianto di ventilazione meccanica che sfrutta al massimo le forze naturali di movimentazione dell'aria.

Il sistema di ventilazione ibrida presenta dei vantaggi come il risparmio energetico, la riduzione dei costi di gestione e il miglioramento della qualità dell'aria interna. Inoltre, questo sistema può essere facilmente integrato in edifici esistenti, riducendo la necessità di apportare modifiche strutturali.

1.2.4 Vantaggi svantaggi ventilazione meccanica e ventilazione naturale

Un sistema di ventilazione meccanico presenta numerosi vantaggi rispetto ad uno naturale:

1. **Recupero del calore :** Il sistema di ventilazione meccanica può essere dotato di recuperatore di calore. Pertanto a differenza della ventilazione naturale, dove aprendo le finestre, il calore della stanza viene disperso all'esterno, con la ventilazione meccanica e con i moderni recuperatori di calore è possibile risparmiare fino all'80% dell'energia termica per ventilare la stanza. Senza poi considerare il discomfort che si crea aprendo le finestre dell'aula durante il periodo invernale solo per arieggiare gli ambienti. Nel nord Italia dove le temperature sono severe per buona parte dell'anno l'impianto VMC si rivela essenziale per contenere il fabbisogno di energia termica e al contempo garantire una buona areazione degli spazi interni.
2. **Filtraggio degli inquinanti:** uno dei principali vantaggi della ventilazione meccanica rispetto alla ventilazione naturale riguarda il filtraggio dell'aria. Infatti, mentre la

ventilazione naturale si basa sul flusso d'aria naturale, che può portare all'ingresso di aria incontrollata, la ventilazione meccanica utilizza sistemi di filtraggio per rimuovere gli inquinanti dall'aria di ingresso. I sistemi di ventilazione meccanica possono essere dotati di filtri ad alta efficienza, in grado di rimuovere particelle sottili, polveri e allergeni presenti nell'aria. Il sistema di filtraggio è particolarmente importante per le persone con problemi respiratori o allergie, che possono trarre grandi benefici da un sistema di ventilazione meccanica che rimuove gli inquinanti dall'aria di ingresso. Inoltre i sistemi di ventilazione garantiscono un flusso d'aria costante e controllato, indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne. Ciò significa che l'aria di ingresso viene filtrata e controllata, garantendo una maggiore qualità dell'aria interna rispetto alla ventilazione naturale, che dipende dalle condizioni esterne e può portare all'ingresso di aria incontrollata, e potenzialmente inquinata.

3. **Isolamento acustico:** in un contesto scolastico come all'interno di un'aula, i rumori esterni possono rappresentare una fonte di disturbo per gli studenti e gli insegnanti durante le lezioni. La ventilazione naturale può comportare un'ingresso incontrollato di rumori esterni attraverso le finestre e le porte, che vengono aperte per favorire la ventilazione naturale dell'ambiente. La conseguenza principale di una scarsa qualità acustica è la perdita di concentrazione che accompagna una diminuzione delle prestazioni. Al contrario, un sistema di ventilazione meccanica ben progettato e installato può contribuire a ridurre il livello di rumore all'interno della classe, garantendo un ambiente interno più confortevole e tranquillo. I sistemi di ventilazione meccanica possono essere dotati di ventilatori silenziosi e posizionati in modo strategico per ridurre la trasmissione del rumore attraverso le aperture. In questo modo, gli studenti e gli insegnanti possono concentrarsi meglio durante le lezioni e ridurre lo stress causato dai rumori esterni.
4. **Condizioni interne costanti:** la ventilazione naturale si basa sulla forza del vento e sulla differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno per far circolare l'aria all'interno di un edificio. Tuttavia, quando non c'è vento o le temperature tra interno ed esterno sono uguali, la ventilazione naturale può presentare svantaggi rispetto alla ventilazione meccanica. In particolare, quando le condizioni esterne non favoriscono la ventilazione naturale, può essere difficile garantire un adeguato ricambio d'aria all'interno dell'edificio. Questo pertanto può portare ad una ridotta qualità dell'aria interna e ad un accumulo di inquinanti interni.
D'altra parte, la ventilazione meccanica può garantire un'adeguata circolazione dell'aria all'interno dell'edificio indipendentemente dalle condizioni esterne, fornendo un controllo più preciso sulla qualità dell'aria interna.
5. **Precisione:** tramite la VMC, è possibile gestire la portata di aria fresca a seconda

del tasso di occupazione o della concentrazione di inquinanti rilevata all'interno degli ambienti, monitorati attraverso sensori appositamente predisposti e collegati al sistema di controllo dei ventilatori. Viceversa, con la ventilazione naturale non si ha un controllo così accurato essendo subordinata alle condizioni meteorologiche esterne e alla percezione soggettiva degli occupanti. Ad esempio, in inverno gli insegnanti sono soliti aprire le finestre solamente durante gli intervalli, per evitare di esporre gli studenti all'ingresso di aria fredda. Tale comportamento, però, si ripercuote pesantemente sulla qualità dell'aria interna, poiché impedisce alla CO₂ di scendere sotto valori accettabili durante la stagione fredda.

inoltre è necessario tenere in conto che i sistemi di ventilazione meccanica possono essere progettati separatamente rispetto a design dell'edificio, la ventilazione naturale deve essere concepita congiuntamente all'immobile e ai suoi componenti. Tutti questi fattori, in aggiunta alle crescenti prestazioni dei ventilatori insieme ai sempre più efficienti metodi di progettazione degli impianti, hanno reso la ventilazione meccanica controllata VMC una risorsa indispensabile per gli ambienti interni densamente affollati.

Capitolo 2

Ventilazione a dislocamento

La *displacement ventilation* DV (ventilazione a dislocamento) è una tecnica di ventilazione meccanica. Ha raggiunto grande popolarità nel nord Europa, in particolare nei paesi scandinavi, e le sue prospettive di diffusione anche nei paesi mediterranei sono incoraggianti. Già largamente utilizzata in applicazioni industriali dagli anni '70 si è poi diffusa con successo anche in ambito civile (uffici, ristoranti, aule scolastiche, etc.) negli anni '80 e '90, contribuendo così al diffondersi di un consenso sempre più ampio di questa soluzione impiantistica. Negli Stati Uniti questo tipo di sistema sta diventando molto popolare soprattutto in ambito scolastici, tanto che CHSP (Collaborative for High Performance Schools) raccomanda la DV. I pregi della ventilazione a dislocamento sono infatti sia la possibilità di ottenere un elevato grado di qualità dell'aria sia di adottare una strategia efficiente di rimozione dei carichi termici. La DV sfrutta come principio base di funzionamento la differenza di densità dell'aria in ambiente che, riscaldandosi, si muove naturalmente verso l'alto.

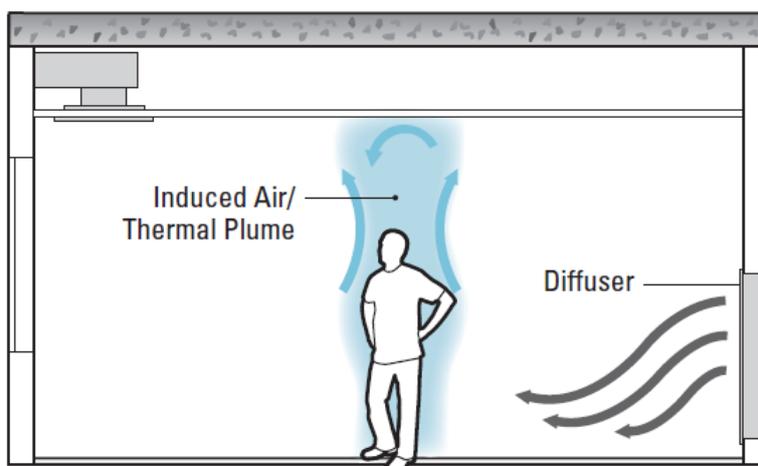


Figura 2.1 Ventilazione a dislocamento [8]

Il moto dell'aria all'interno di un locale ventilato può riferirsi sostanzialmente a due differenti tipologie, miscelazione MV o dislocamento DV. Nella prima, più comunemente usata, l'aria è immessa in modo tale che si crei una completa miscelazione nella stanza e che quindi la concentrazione di inquinante sia la stessa in tutti i punti. Nella ventilazione a dislocamento l'aria "fresca e pulita" viene immessa nei locali a livello del pavimento attraverso un diffusore a bassa velocità a una temperatura leggermente al di sotto di quella dell'ambiente, mentre l'aria "calda e contaminata" viene rimossa a livello del soffitto (figura 2.1). Il movimento dell'aria nell'ambiente è guidato dalle sorgenti interne di calore. Queste, infatti, creano dei moti convettivi ascensionali che richiamano l'aria circostante e la veicolano verso l'alto. Quando le sorgenti di calore sono anche sorgenti di contaminante (sorgenti inquinanti calde), i moti convettivi da esse generate trasportano con loro anche i contaminanti.

In particolare, nel locale si possono individuare due zone ben definite: una zona superiore con aria calda e contaminata e una zona inferiore, nella quale stazionano gli occupanti, con aria fresca e pulita. L'altezza che delimita le due zone è detta altezza del piano neutro *neutral height* o altezza della zona a flusso stratificato *stratification height*, ed è un parametro fondamentale nel progetto dei sistemi a displacement ventilation. In figura 2.2 sono messi a confronto due sistemi di ventilazione. A sinistra la ventilazione a completa miscelazione mentre a destra la ventilazione a dislocamento. Si vede chiaramente come nella DV ha senso parlare di piano neutro in quanto questo separa due zone con concentrazioni di inquinanti diverse.

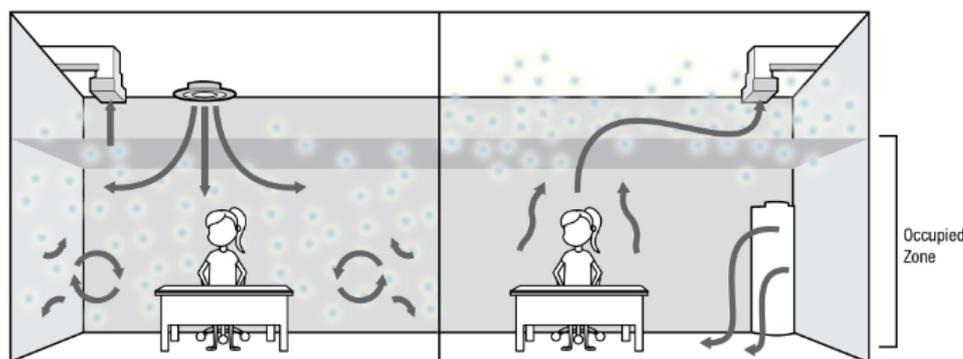


Figura 2.2 Sistema a completa miscelazione (MV) e a dislocamento (DV) a confronto [8]

Stando a quanto detto i sistemi a DV sono quindi da preferire quanto il principale problema è il mantenimento di una buona IAQ e funzionano molto bene quando le sorgenti inquinanti sono anche calde e quindi in grado di generare forti moti convettivi (ad esempio le persone). Inoltre la DV è particolarmente efficace in cui l'altezza della zona occupata è piccola rispetto all'altezza totale della stanza.

2.1 Fisica della ventilazione a dislocamento

I fenomeni del gradiente termico di temperatura e i piani di stratificazione possono essere descritti attraverso il numero di Archimede.

$$Ar = \frac{\Delta\rho gL}{\rho v^2} \quad (2.1)$$

dove:

$\Delta\rho$ = differenza di densità tra l'aria più fredda e più calda [kg/m^3]

g = accelerazione gravitazionale = $9,81$ [m/s^2]

L = lunghezza caratteristica [m]

ρ = densità dell'aria [kg/m^3]

v = velocità dell'aria [m/s]

Il numero di Archimede descrive il rapporto tra le forze di galleggiamento e le forze di inerzia.

Un valore alto indica che le forze di galleggiamento sono predominanti mentre un valore basso è dovuto al predominare delle forze di inerzia.

I flussi convettivi naturali, noti anche come *pennacchi termici*, sono il motore della ventilazione a dislocamento e non sono altro che una corrente d'aria ascensionale al di sopra di un oggetto caldo, come le persone o i computer, che sale lungo una parete calda, o scende in presenza di elementi freddi come finestre o altre pareti, tutto ciò per effetto delle forze di galleggiamento.

Tutti i pennacchi sono caratterizzati da un moto turbolento e seguono le leggi di similitudine fluidodinamica proprie dei moti turbolenti. La portata d'aria in un flusso convettivo ascendente cresce con l'altezza per effetto del richiamo d'aria dell'ambiente circostante.

In figura 2.3 sono mostrati i pennacchi termici generati da un punto (puramente teorico) e da un cilindro.

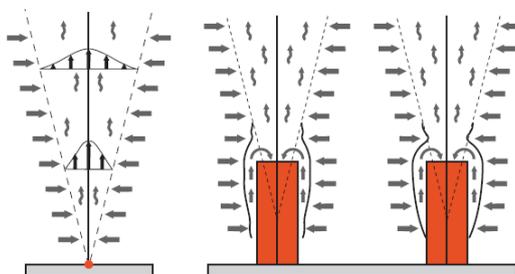


Figura 2.3 Pennacchi termici generati da un punto e da un cilindro [8]

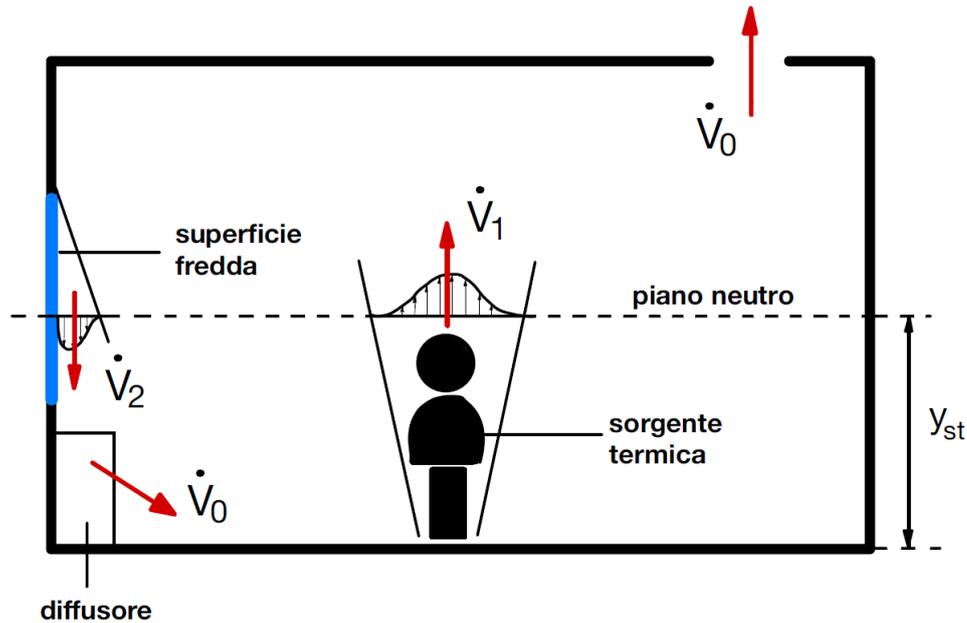


Figura 2.4 Bilancio di portata in un locale con ventilazione a dislocamento

L'altezza del piano neutro y_{st} che definisce la separazione tra le due zone si ricava facilmente dall'equazione di conservazione della massa nel volume di controllo [10] vedi figura 2.4:

$$\dot{V}_1 - \dot{V}_2 = \dot{V}_0 \quad (2.2)$$

dove:

\dot{V}_1 =rappresenta la portata generata dalla sorgente termica presente nella stanza [m^3/s]

\dot{V}_2 =la portata legata al flusso d'aria discendente dovuto alle pareti laterali fredde [m^3/s]

\dot{V}_0 =portata di ventilazione [m^3/s]

La portata \dot{V}_1 non è costante ma cresce con l'aumentare della distanza dalla sorgente termica, per effetto del richiamo di aria fresca costante, da parte del pennacchio termico. Quindi \dot{V}_1 dipende sia dalla potenza termica della sorgente ϕ sia dalla distanza y [10]:

$$\dot{V}_1 \propto \phi \cdot y \quad (2.3)$$

La portata \dot{V}_1 è calcolata ponendo il valore dell'altezza y pari a quella del piano neutro y_{st} . Alla stessa maniera il flusso discendente d'aria causato dalla presenza delle pareti laterali fredde \dot{V}_2 è esprimibile in funzione della differenza di temperatura tra aria ambiente e superficie fredda ΔT e dalla distanza tra l'altezza del piano neutro e il lato superiore della superficie fredda d [10].

$$\dot{V}_2 \propto \Delta T \cdot d \quad (2.4)$$

Una volta calcolati i valori di \dot{V}_1 e \dot{V}_2 è possibile ricavare tramite l'espressione 2.2 la portata di ventilazione \dot{V}_0 tramite la quale si ottiene l'altezza y_{st} del piano neutro desiderata.

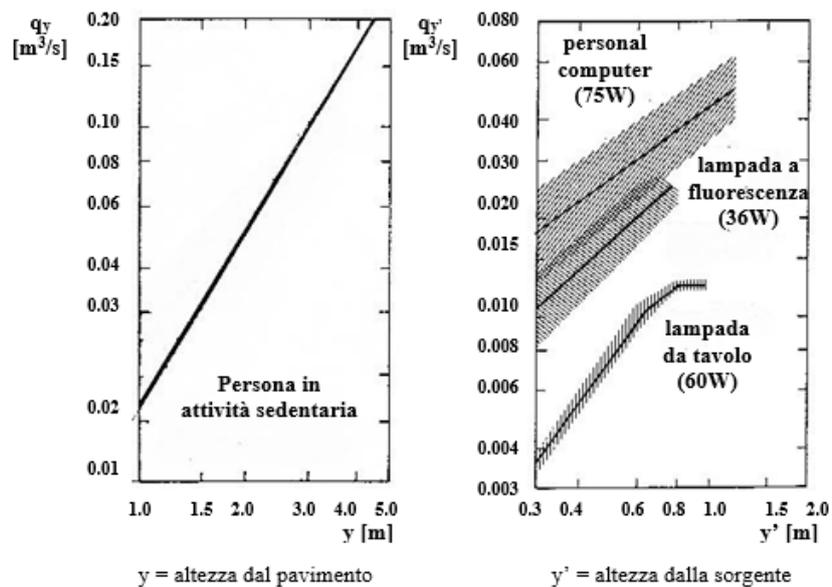


Figura 2.5 Flusso d'aria convettivo q_v [m³/s] generato sopra di differenti sorgenti termiche al variare dell'altezza [9]

Dagli studi sperimentali di Nielsen (1993) [9] sono stati ricavati i seguenti diagrammi 2.5 che illustrano il flusso d'aria convettivo generato da sorgenti termiche diverse con l'aumentare della distanza tra le stesse.

2.1.1 Immissione dell'aria

Tipicamente l'aria è immessa a una temperatura inferiore rispetto a quella dell'ambiente (da 1 a 8 °C), in questo caso l'aria immessa dal dislocatore "cade" verso il pavimento e si diffonde come un manto che copre il pavimento stesso [11].

In condizioni isoterme, cioè quando l'aria è immessa alla stessa temperatura di quella ambiente, l'aria stessa fluirà in ambiente orizzontalmente, seguendo la direzione con la quale inizialmente ha lasciato il dislocatore.

Se invece l'aria è immessa a una temperatura maggiore di quella dell'ambiente, questa salirà nella zona occupata senza diffondersi.

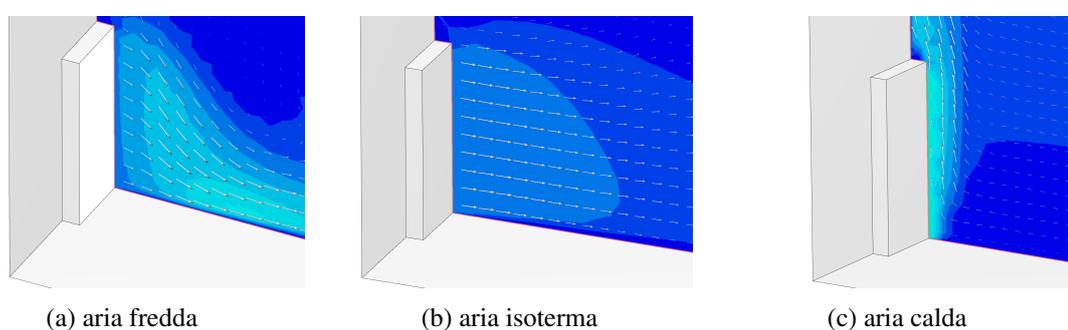


Figura 2.6 Variazione della direzione del flusso d'aria in ingresso a seconda della temperatura dell'aria di immissione rispetto alla temperatura della stanza

Da tali considerazioni ne deriva che la ventilazione a dislocamento può essere usata efficacemente solo con immissione d'aria più fredda di quella dell'ambiente. La situazione in figura 2.6c può essere accettata solo per il preriscaldamento dell'aria ambiente nei periodi di non occupazione del locale.

Viene definita **zona adiacente** oppure **zona di prossimità** una porzione di spazio vicino al dislocatore nella quale l'immissione di aria può causare un aumento dei rischi di discomfort.

La lunghezza di questa zona " l_n " è definita come la distanza dal dislocatore alla quale la velocità dell'aria scende ad un valore prefissato di velocità di 0,2 m/s. L'ampiezza della questa zona è direttamente proporzionale alla portata di immissione e inversamente proporzionale alla temperatura di immissione. Quindi se la portata aumenta oppure se la temperatura dell'aria di immissione diminuisce allora la zona adiacente si espande.

$$l_n \propto \dot{V}_1 \qquad l_n \propto 1/T \qquad (2.5)$$

La zona adiacente può avere diverse forme (figura 2.7) a seconda della geometria del diffusore. La più recente generazione di dislocatori presenta una distribuzione dell'aria

con alta velocità in direzione parallela alla parete e velocità più basse in direzione perpendicolare (immissione laterale). Questi possono essere regolati ad un livello di miscelazione e turbolenza così elevato che, davanti al dislocatore, il forte effetto di richiamo d'aria dall'ambiente circostante elimina gran parte della differenza di temperatura esistente tra l'aria immessa e quella ambiente [11].

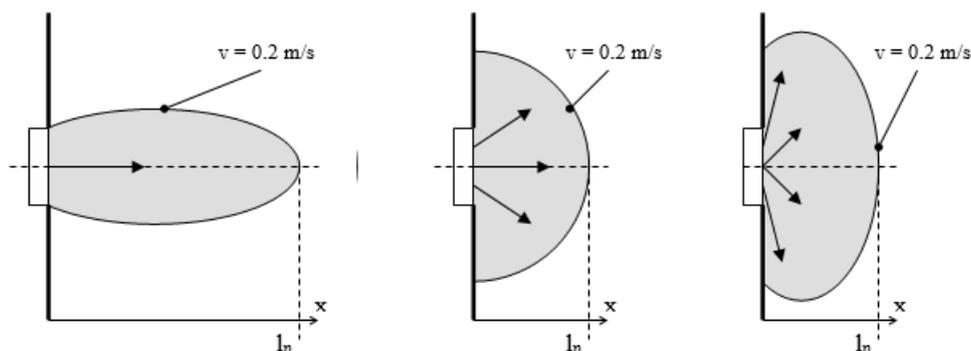


Figura 2.7 Forma della zona adiacente per diffusori a parete con diverse modalità di immissione dell'aria in ambiente [10]

Lo spessore tipico del flusso d'aria a pavimento è di circa 20 cm e la sua massima velocità si registra a circa 2 cm dal pavimento. Misurazioni condotte [11] hanno dimostrato che l'effetto di richiamo dell'aria ambiente circostante da parte di questo flusso d'aria orizzontale è estremamente ridotto e che il suo spessore è costante e funzione del numero di Archimede.

Sistemi di controllo

I sistemi di controllo per la ventilazione a dislocamento non differiscono sostanzialmente da quelli per la ventilazione a miscelazione. La principale differenza consiste nella posizione dei sensori per la temperatura e la qualità dell'aria.

La ventilazione a dislocamento si sposa bene con gli impianti a portata variabile. Se si riduce la portata d'aria che fluisce attraverso un dislocatore allora anche l'ampiezza della zona adiacente diminuisce. In questi impianti la quantità d'aria è regolata sulla base della qualità dell'aria o della temperatura nella zona occupata.

Il sensore di temperatura andrebbe posizionato a un'altezza di 0,2-0,5 m dal pavimento che consentirebbe di evitare che si creino correnti d'aria fredde a pavimento. I sensori di qualità dell'aria dovrebbero essere invece collocati all'altezza di inalazione di una persona seduta, cioè tra 1 e 1,5 m dal pavimento.

Negli ambienti in cui le persone si trovano a diverse altezze (ad esempio negli auditorium), i sensori di temperatura dovrebbero essere posti sia nella parte bassa sia al limite superiore

della zona occupata. Per quanto riguarda i sensori di qualità dell'aria, questi dovrebbero essere collocati al limite superiore della zona occupata, perché questa è la parte in cui la qualità dell'aria è inferiore.

2.1.2 Distribuzione degli inquinanti

La distribuzione dei contaminanti in un locale con ventilazione a dislocamento dipende dalla posizione delle sorgenti inquinanti e dal fatto che queste siano anche sorgenti termiche. Nel caso di una scuola dove le fonti di inquinanti sono rappresentate dalle persone, le quali sono anche fonte di calore, i contaminanti vengono direttamente trasportati nella parte alta del locale. La concentrazione di contaminante è naturalmente influenzata anche dai flussi convettivi discendenti che possono originarsi sulle pareti verso l'esterno durante la stagione fredda, specialmente in presenza di pareti a basso isolamento termico. Tali flussi sono dannosi perché trasportano gli inquinanti nel locale dalla zona superiore indietro a quella inferiore.

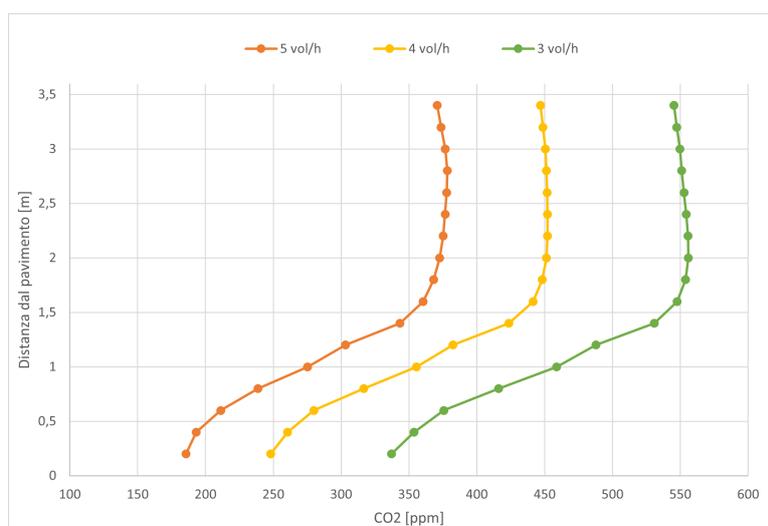


Figura 2.8 Distribuzione verticale della concentrazione di CO₂ relativa per 3 diverse portate di aria di rinnovo

In figura 2.8 sono raffigurate tre diverse distribuzioni verticali di CO₂ per tre diverse portate di rinnovo a parità di condizioni. Osservando il grafico dal basso, si nota una prima fase di gradiente elevato, nella quale la CO₂ cambia rapidamente, per poi stabilizzarsi ad un valore costante dopo il piano neutrale. Questa è una tipica distribuzione di CO₂ in un locale dove le fonti inquinanti principali sono le persone.

Nella realtà il flusso termico intorno a una persona o lo stesso movimento dell'aria dovuto alle attività umane, richiama l'aria dal basso (figura 2.9). Questo porta a un beneficio nella

rimozione del contaminante grazie alla risalita di aria pulita dalla parte bassa del locale e quindi rende possibile lavorare con un'altezza del piano neutro più bassa dell'altezza di inalazione convenzionale.

Diminuire l'altezza del piano neutro consegue ad avere portate di rinnovo più piccole e minor consumo di energia. Come però dimostrato dallo studio [33], il richiamo di aria dal basso ha lo svantaggio di risospingere le particelle che si erano depositate a terra.

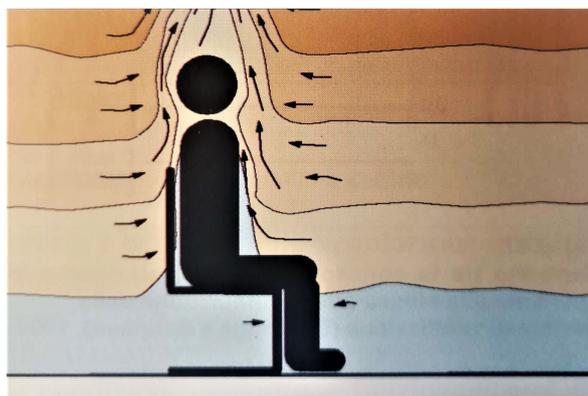


Figura 2.9 Pennacchio termico che richiama l'aria più pulita (colore azzurro) dal basso [11]

2.2 Indici per valutare l'efficienza di ventilazione

Per dimostrare l'efficacia dei sistemi di ventilazione e garantire una buona IAQ all'interno di un ambiente è stato necessario creare degli indici qualitativi riguardanti la distribuzione dell'aria e degli inquinanti. In una situazione puramente teorica di ventilazione a completa miscelazione (MV, *mixing ventilation*) si assume che l'aria sia completamente miscelata nella stanza; la concentrazione di inquinante è uguale in tutti i punti e quindi sarà la stessa della bocchetta di ripresa dell'aria.

Tuttavia, nella realtà il trasporto degli inquinanti viene influenzato da fenomeni fisici come il trasporto molecolare e la convezione. Pertanto la concentrazione nella stanza può essere più o meno alta rispetto alla ripresa a seconda dei punti. Solitamente bassi valori di velocità dell'aria portano ad avere punti di ristagno nei quali tendono ad accumularsi gli inquinanti. Questi punti di ristagno possono anche essere generati da ostacoli oppure da gradienti di temperatura.

Se le particelle sono abbastanza grandi allora anche la gravità esercita un'influenza su di loro. Ad esempio, particelle dalla grandezza di $50 \mu m$, una volta che si sono depositate su superfici (come ad esempio banchi scolastici), saranno poco influenzate dal movimento dell'aria e rimarranno attorno a quella superficie.

I principali indici per la valutazione della qualità dell'aria sono quattro e sono suddivisi in due categorie:

- Indici che rappresentano l'abilità del sistema a ricambiare l'aria nella stanza: sono usati quando si hanno poche informazioni sulle sorgenti di contaminanti presenti.
 - Air change efficiency ε^a
 - Local air change efficiency ε_p^a
- Indici che rappresentano l'abilità del sistema di rimuovere inquinanti nella stanza: si usano quando le sorgenti di inquinanti sono note.
 - Contaminant removal effectiveness (CRE) ε^c
 - Local air quality index ε_p^c

2.2.1 Età dell'aria

Per età dell'aria, dall'inglese *age of air*, si intende un concetto che è stato introdotto per la prima volta da Sandberg (1981). L'età media dell'aria è uno strumento molto utile per la valutazione dell'efficienza di ventilazione. È un concetto statistico basato sulla distribuzione dell'età dell'aria. L'età viene conteggiata dal momento in cui l'aria entra nella stanza e diventa una miscela di componenti che hanno trascorso tempi diversi nell'ambiente durante i quali si sono contaminati. Per età media dell'aria $\bar{\tau}_p$, si intende la misurazione della qualità dell'aria in un punto preciso.

In una situazione puramente teorica di ventilazione a completa miscelazione MV, l'età media dell'aria è uguale in tutti i punti della stanza e quindi uguale anche alla ripresa τ_n la quale è sempre costante e viene calcolata come:

$$\tau_n = \frac{V}{q_v} \quad (2.6)$$

con:

V = volume della stanza [m^3]

q_v = portata di ventilazione [m^3/s]

2.2.2 Air change efficiency - ACE

Il parametro ε^a , indica la capacità di un sistema di ventilazione di rinnovare l'aria in un ambiente. L'ACE è definito come un rapporto tra il tempo di ricambio dell'aria più breve possibile e il tempo di ricambio dell'aria effettivo. Il tempo effettivo di ricambio dell'aria

$\bar{\tau}_r$ è direttamente correlato all'età media dell'aria riferita a tutto il volume della stanza $\langle \bar{\tau} \rangle$ secondo questa relazione:

$$\bar{\tau}_r = 2\langle \bar{\tau} \rangle \quad (2.7)$$

Quindi in definitiva è possibile calcolare ε^a come:

$$\varepsilon^a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} \cdot 100 = \frac{\tau_n}{2\langle \bar{\tau} \rangle} \cdot 100 [\%] \quad (2.8)$$

Il limite superiore di questo indice è 100% che corrisponde alla situazione ideale di ventilazione a pistone. Nella tabella 2.1 viene mostrata la variazione dell'efficienza ε^a per diverse strategie di ventilazione.

Tipo di ventilazione	Air change efficiency ε^a
Ventilazione ideale a pistone a)	100%
Ventilazione MV ideale b)	50%
Ventilazione DV c)	$50\% \leq \varepsilon^a \leq 100\%$
Ventilazione con cortocircuito d)	$\leq 50\%$

Tabella 2.1 ε^a per diverse strategie di ventilazione

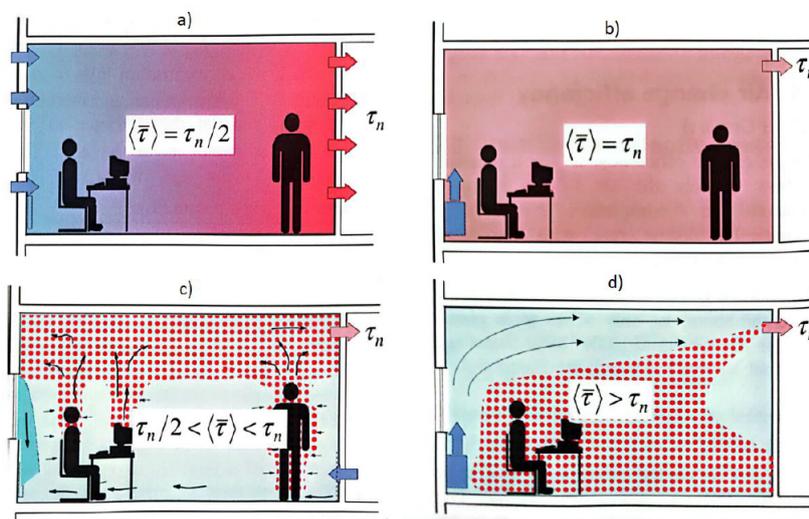


Figura 2.10 Età media dell'aria della stanza $\langle \bar{\tau} \rangle$ e età media dell'aria alla ripresa τ_n per differenti tipi di ventilazione [12]

Un altro indice importante è il *local air change index*, ε_p^a che si usa per valutare le condizioni di uno specifico punto. Può avere valori molto diversi a seconda del punto della

stanza in cui viene fatta la misurazione.

$$\varepsilon_p^a = \frac{\tau_n}{\tau_p} \quad (2.9)$$

Nel caso di ventilazione ideale a completa miscelazione questo indice è uguale in tutti i punti della stanza e pari al 100 %.

2.2.3 Contaminant removal effectiveness - CRE

Il CRE indica "quanto velocemente" un contaminante viene estratto dalla stanza. È definito come la concentrazione di contaminante all'estrazione c_e diviso la concentrazione media di inquinante della stanza $\langle c \rangle$.

$$\varepsilon^c = \frac{c_e}{\langle c \rangle} \quad (2.10)$$

In una strategia di ventilazione ideale a completa miscelazione $\varepsilon^c = 1$, mentre negli altri casi questo valore è molto variabile perché fortemente dipendente dalla posizione dell'inquinante nella stanza e alla tipologia di ventilazione adottata.

Quando le sorgenti di contaminanti sono sparse nella stanza (ad esempio persone in un'aula) allora si può assumere in prima approssimazione che $\varepsilon^c = 2\varepsilon^a$. Quando invece le sorgenti di contaminanti non sono distribuite uniformemente allora a seconda della loro posizione nella stanza il valore di ε^c cambia.

In alcuni casi si ottengono valori di ε^c molto alti che non sono sufficienti a dimostrare che il sistema di ventilazione funziona in modo soddisfacente. Di seguito alcuni esempi:

- Persone in una zona stagnante $\Rightarrow c_e \ll \langle c \rangle \Rightarrow \varepsilon^c \downarrow$
- Persone vicino alla rete di ripresa $\Rightarrow c_e \gg \langle c \rangle \Rightarrow \varepsilon^c \uparrow$
- Ventilazione ideale a completa miscelazione $\Rightarrow c_e = \langle c \rangle \Rightarrow \varepsilon^c = 1$

La CRE può essere introdotta nell'equazione per il calcolo del bilancio di massa degli inquinanti 1.4 ottenendo un'equazione per il calcolo della concentrazione a regime stazionario tramite la quale si ricava l'espressione valida per il calcolo della concentrazione in regime transitorio (funzione del tempo t), indicata nella 2.11.

$$c(t) = c_{out} + \frac{g}{\varepsilon^c Q} + \left(c_0 - c_{out} - \frac{g}{\varepsilon^c Q} \right) e^{-\varepsilon^c \frac{Q}{V} t} \quad (2.11)$$

Grazie a questa formulazione è possibile determinare l'andamento della concentrazione media sul volume nel tempo al variare del numero dei ricambi d'aria, assumendo un valore predeterminato dell'efficienza di ventilazione o viceversa.

2.2.4 Local air quality index

Si usa quando si vuole misurare la concentrazione locale di uno specifico punto e si indica con ε_p^c . A seconda del punto in cui viene effettuata la misurazione, l'indice viene calcolato tramite formule diverse:

- $\varepsilon_{oz}^c = \frac{c_e}{c_{oz}}$ con c_{oz} concentrazione media della zona occupata dalla persone.
- $\varepsilon_b^c = \frac{c_e}{c_b}$ con c_b concentrazione media della zona di respirazione delle persone.
- $\varepsilon_{exp}^c = \frac{c_e}{c_{exp}}$ con c_b concentrazione media dell'aria che viene inalata.

Seppur si possa pensare che i coefficienti ε_b^c e ε_{exp}^c siano praticamente la stessa cosa in realtà hanno valori differenti. I pennacchi termici che si creano attorno a una persona (come già visto in figura 2.9) e il suo stesso movimento fanno sì che l'aria che viene inalata abbia una concentrazione di inquinante minore rispetto alla concentrazione presente alla stessa altezza, quindi $\varepsilon_b^c < \varepsilon_{exp}^c$.

Pertanto come dimostrato anche nel paragrafo precedente nel caso di ventilazione a dislocamento è possibile progettare l'impianto con un'altezza di stratificazione inferiore all'altezza della zona di respiro.

2.3 Comfort termico globale

La sensazione di comfort termico globale di una persona è legata principalmente al bilancio di energia sul corpo umano il quale dipende dall'attività, dall'abbigliamento e da alcuni parametri ambientali come: temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità dell'aria e grado igrometrico.

Una condizione necessaria per l'ottenimento del comfort termico globale è che l'energia interna del corpo umano rimanga costante ovvero equivale a porre:

$$f(\text{vestiario}, \text{attività}', t_a, v_a, UR, t_r, t_{sk}, E_{sw}) = 0 \quad (2.12)$$

L'equazione 2.12 rappresenta il termine di accumulo energetico del corpo umano e dipende principalmente da 8 variabili, due delle quali riguardano il soggetto (abbigliamento e attività), quattro sono legate alle condizioni dell'ambiente (temperatura, velocità e grado igrometrico dell'aria e temperatura media radiante) e le ultime due sono di natura fisiologica (temperatura della pelle e potenza termica evaporativa legata alla sudorazione). Le ultime due sono legate alle altre tramite relazioni complesse e quindi non sono indipendenti. Quindi le effettive variabili indipendenti da cui dipende il comfort termico globale sono sei, il che vuol dire che concettualmente ci possono essere ∞^5 combinazioni delle variabili per cui l'equazione sopra risulta soddisfatta.

2.3.1 Indici di comfort termico globale

La sensazione termica del corpo nel suo complesso può essere prevista calcolando il voto medio previsto, **PMV**.

Il PMV è stato introdotto per la prima volta da *Fanger* (1970), ed è un indice basato sul bilancio di energia termica sul corpo umano che rappresenta il voto medio espresso da un numeroso gruppo di persone sulla scala di sensazione termica a sette punti, vedi tabella 2.2:

Voto	Sensazione
+3	molto caldo
+2	caldo
+1	leggero caldo
0	neutralità
-1	leggero freddo
-2	freddo
-3	molto freddo

Tabella 2.2 Scala di sensazione a 7 punti

L'equilibrio termico si ottiene quando la produzione di energia termica all'interno del corpo uguaglia la dispersione di energia termica verso l'ambiente. L'indice PMV è quindi utilizzato per valutare il comfort/discomfort termico delle persone negli ambienti climatizzati e non.

Fanger inoltre formulò anche le seguenti relazioni:

$$E_{sw} = 0,42[(M - W) - 58,2] \quad (2.13)$$

$$t_{sk} = 35,7 - 0,0275 \frac{(M - W)}{A_b} \quad (2.14)$$

Le equazioni 2.13 e 2.14 esprimono che E_{sw} (potenza termica evaporativa legata alla sudorazione) e t_{sk} (temperatura della pelle) in condizioni di comfort termico sono funzione dell'attività effettivamente svolta dal soggetto.

Sono indicati con M il metabolismo energetico del soggetto [W], W la potenza meccanica efficace [W] e A_b l'area della superficie corporea [m²].

Il calcolo della PMV si basa sulle seguenti ipotesi:

- La sensazione termica è legata al carico termico L , definito come la differenza tra la produzione interna di calore ($M - W$) e la dispersione di calore verso l'ambiente effettivo da parte di un uomo ipoteticamente mantenuto in condizioni di comfort.
- L'equazione che descrive la relazione tra il PMV ed il carico termico è:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot L \quad (2.15)$$

Un altro indice formulato da Fanger è il **PPD** (Percentuale Prevista di Insoddisfatti) che rappresenta la percentuale di persone che votano ± 2 o ± 3 sulla scala di tabella 2.2.

La relazione tra il PMV e il PPD è rappresentata in figura 2.11 :

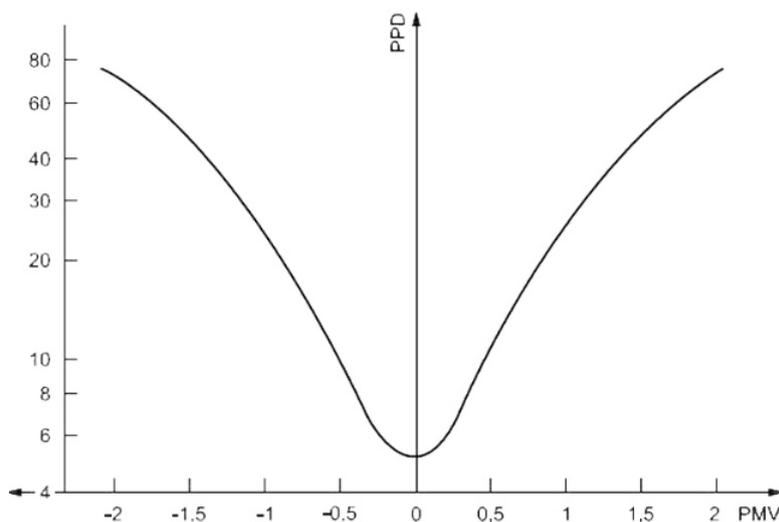


Figura 2.11 PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti) in funzione del PMV (Voto Medio Previsto). Da UNI EN ISO 7730 [13]

2.3.2 Discomfort termico locale

per discomfort locale si intende un un raffreddamento o da un riscaldamento indesiderati di una particolare parte del corpo. Gli indici PMV e PPD sono utili per valutare la condizione di comfort o discomfort termico per il corpo nel suo complesso.

Il discomfort locale può essere dovuto a:

- correnti d'aria;
- differenza verticale di temperatura dell'aria;
- pavimento caldo o freddo;
- asimmetria della temperatura radiante.

Partendo dalle **correnti d'aria**, il discomfort causato da queste può essere espresso come la percentuale prevista di persone insoddisfatte per correnti d'aria DR (Draught Rate):

$$DR = (34 - t_a) \cdot (v_a - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v_a \cdot T_u + 3,14) \quad (2.16)$$

dove:

t_a = temperatura locale dell'aria [°C]

v_a = velocità dell'aria locale [m/s], si suppone essere minore di 0,5 m/s

T_u = intensità di turbolenza [-]

Tale approccio, come citato nella norma UNI EN ISO 7730 [13], si applica soltanto ad individui seduti, con attività metabolica leggera e con sensazione termica approssimativamente neutra. Il modello fornisce previsioni affidabili per correnti che impattano la zona del collo. Al livello delle braccia o delle gambe il discomfort è normalmente inferiore a quello previsto dalla equazione, così come è inferiore se l'attività del soggetto è significativa.

Un'elevata **differenza verticale di temperatura dell'aria** tra il livello della testa e le caviglie può causare discomfort. In figura 2.12 è mostrata la percentuale di insoddisfatti (PD) prevista in funzione della differenza verticale di temperatura tra testa e caviglie.

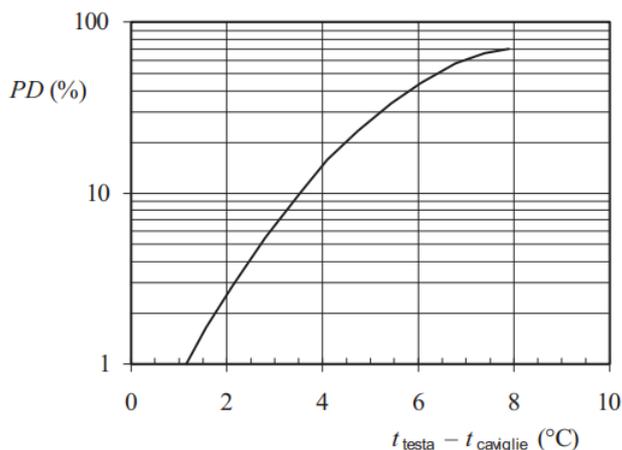


Figura 2.12 Percentuale di insoddisfatti (PD) in funzione della differenza di temperatura tra testa e caviglie. Da UNI EN ISO 7730 [13]

Se il **pavimento è caldo o freddo**, gli occupanti potrebbero avvertire una sensazione di discomfort. In figura 2.13 è mostrata la percentuale di insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento.

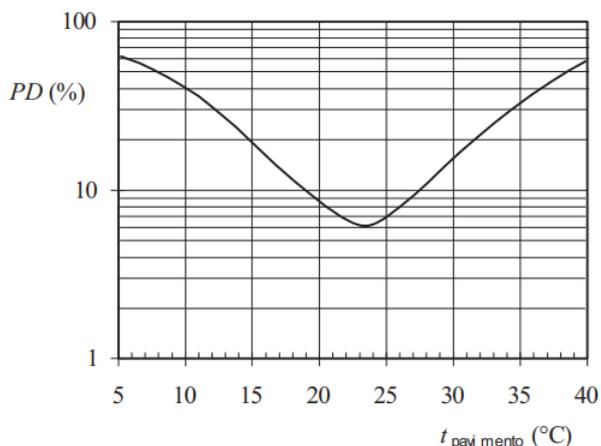


Figura 2.13 Percentuale di insoddisfatti (PD) in funzione della temperatura del pavimento. Da UNI EN ISO 7730 [13]

Infine anche l' **asimmetria della temperatura radiante** Δt_{pr} può causare discomfort. Le persone sono particolarmente sensibili all'asimmetria radiante dovuta a soffitti caldi o pareti fredde (finestre). In figura 2.14 è mostrata la percentuale di insoddisfatti in funzioni dell'asimmetria della temperatura radiante causata da un soffitto caldo, una parete fredda, un soffitto freddo o una parete calda.

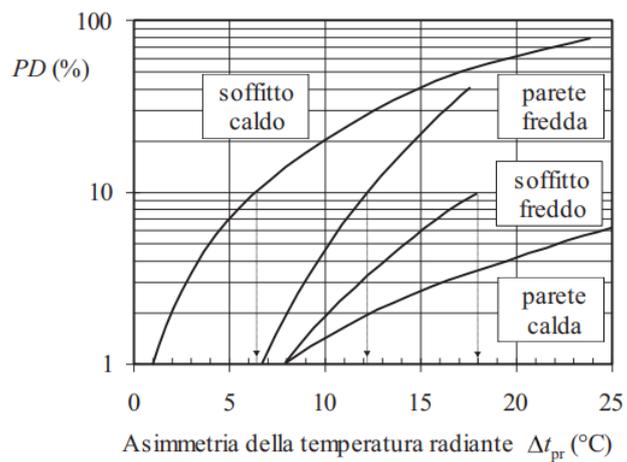


Figura 2.14 Percentuale di insoddisfatti (PD) in funzione della temperatura radiante. Da UNI EN ISO 7730 [13]

Capitolo 3

Situazione normativa e inquinanti indoor

La scuola rappresenta la vetrina di un Paese, eppure è sempre stata dimenticata, ne è un esempio lo stato in cui versano la maggior parte degli edifici, strutture vecchie che non sono mai state adeguate ad elevati standard di sicurezza e di salubrità le quali, oggi più che mai, anche a fronte della recente pandemia, stanno scontando questo ritardo.

In questo capitolo verranno così analizzate le principali normative che regolamentano le portate di ventilazione negli ambienti interni, concentrandosi in particolare su quelle relative alle aule scolastiche; in seguito verranno elencati i principali inquinanti degli ambienti indoor insieme alla loro pericolosità.

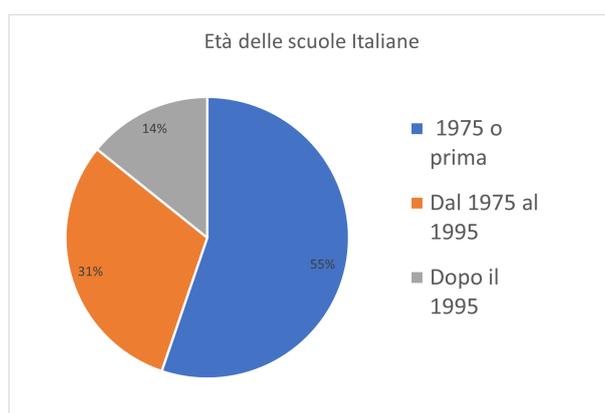


Figura 3.1 Anno di costruzione scuole Italiane, dati scaricati dal sito del MIUR [14]

In ambito scolastico gli impianti di VMC sono sempre stati considerati come un servizio aggiuntivo quando, come abbiamo visto nei capitoli precedenti, si tratta di uno strumento

essenziale per la salute e l'apprendimento degli studenti.

La qualità dell'aria nelle scuole italiane è scarsa [22] e questo è dovuto alla mancanza di adeguati sistemi di ventilazione che nonostante l'obbligatorietà sancita dal Decreto Ministeriale del 1975 non sono mai stati implementati nelle nuove costruzioni.

La figura 3.1 illustra gli open-data relativi alla costruzione degli edifici scolastici consultati sul sito del MIUR (Ministero dell'Istruzione e del Merito)[14]. Come si vede dal grafico a torta, l'Italia è un Paese che basa la sua istruzione su un parco edilizio che per più della metà risale a prima del 1975 e con un'età media di circa 52 anni.

Grazie poi agli stessi dati, riusciamo anche a calcolare quante scuole dispongono di un impianto VMC, di seguito illustrate alla figura 3.2.

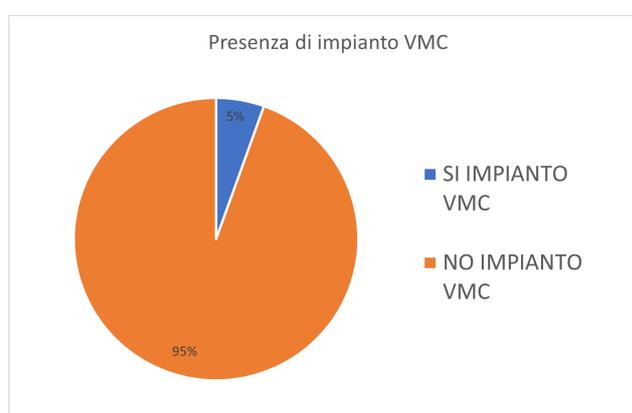


Figura 3.2 Percentuale di scuole italiane con un impianto VMC [14]

I prossimi paragrafi analizzano il contenuto delle norme e dei decreti in materia di ventilazione meccanica negli ambienti scolastici, quali sono le portate che raccomandano e quali invece dovrebbero essere obbligatorie.

3.1 Situazione normativa

3.1.1 Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975

Il Decreto Ministeriale intitolato "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica" [19] rappresentò, per quegli anni, una rivoluzione nel mondo dell'edilizia scolastica. Contiene un'ampia ed esaustiva descrizione degli aspetti urbanistici e presenta una visione della funzionalità e della spazialità dell'edificio avanzatissima considerando che risale a più di 40 anni fa.

Il decreto interviene anche sulla qualità interna dell'aria IAQ, specifica che gli edifici scolastici devono essere costruiti lontano da sorgenti inquinanti e che le condizioni di qualità dell'aria interna devono essere garantite a prescindere da quelle esterne. Il decreto

impone la "purezza chimica e microbiologica dell'aria", stabilendo un numero di ricambi d'aria all'ora (tabella 3.1), il cui valore varia a seconda della destinazione d'uso degli ambienti scolastici, facendo poi anche riferimento alla posizione della presa d'aria esterna e alla tenuta dell'aria degli infissi. Con h^{-1} si intende il ricambio di volume d'aria all'ora; ad esempio per una scuola elementare in cui il volume dell'aula è di 175 m^3 , il ricambio d'aria previsto dal Decreto è $437,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Il decreto stabilisce quanto segue: "dovrà essere assicurata l'introduzione delle seguenti portate d'aria esterna mediante opportuni sistemi".

Con "opportuni sistemi" non si specifica se la ventilazione debba essere effettuata con un impianto VMC o ventilazione naturale tramite l'apertura degli infissi (areazione). Pertanto, questo ha lasciato campo libero a diverse interpretazioni e poi ha consentito di delegare questo obbligo alla semplice areazione naturale tramite la semplice apertura delle finestre.

Portate di ventilazione

Portate di ventilazione			
Aula scuola elementare	$2,5 \text{ h}^{-1}$	Ambienti di passaggio	$1,5 \text{ h}^{-1}$
Aula scuola media	$3,5 \text{ h}^{-1}$	Uffici	$1,5 \text{ h}^{-1}$
Aula scuola superiore	5 h^{-1}	Servizi igienici, palestre	$2,5 \text{ h}^{-1}$

Tabella 3.1 Coefficienti di ricambio d'aria nelle aule e negli ambienti scolastici da D.M. 1975 [19]

La legge dell'11 gennaio 1996 "Norme per l'edilizia scolastica" ha abrogato parzialmente il D.M. 1975 che però mantiene in vigore gli indici di tabella 3.1, i quali ad oggi sono ancora vigenti.

3.1.2 UNI 10339

La norma UNI 10339 [20] fornisce indicazioni in merito alle portate di aria esterna e di estrazione per gli impianti aeraulici da adottare per le diverse tipologie edilizie, tra cui le scuole. Per norma UNI si intende semplicemente un documento che dice "come fare bene le cose", garantendo sicurezza, rispetto per l'ambiente e prestazioni certe. Tuttavia queste non rappresentano obblighi di legge. Quindi le portate alla tabella 3.2 costituiscono un consiglio di buona progettazione e non un obbligo da rispettare.

Portate di ventilazione		
	Portata di aria immessa per persona L/s (m ³ /h)	Portata estratta
Asili nido	3.5 (14,4)	-
Aule scuole elementari	5 (18)	-
Aule scuole medie inferiori	6 (21,6)	-
Aule scuole medie superiori	7 (25,2)	-
Aule universitarie	7 (25,2)	-
Transiti, corridoi	-	-
Servizi		8 vol/h
Biblioteche, sale lettura	6 (21,6)	-
Aule musica e lingua	7 (25,2)	-
Laboratori	7 (25,2)	-
Sale insegnanti	6 (21,6)	-

Tabella 3.2 Portate di rinnovo negli ambienti scolastici [20]

In questo caso, a differenza del D.M 1975, non si parla più di indici di ventilazione h^{-1} ma di portate d'aria per persona. Questa rappresenta una trattazione più corretta perché una grossa problematica del D.M. 75, come poi vedremo nei capitoli successivi, è che le portate possono essere:

- esageratamente alte per stanze molo grandi e poco affollate
- scarse o insufficienti per una buona IAQ interna per stanze piccole densamente affollate

3.1.3 UNI EN 16798-1

La norma UNI EN 16798-1 "Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici" [21] del 2019, fa sempre parte delle regole di buona progettazione, quindi anche essa non sottoscrive un obbligo. La norma propone 3 metodi per calcolare la quantità di aria da immettere per ottenere una buona IAQ interna:

1. **Metodo basato sulla qualità dell'aria percepita:** il tasso di ventilazione totale si ottiene combinando la ventilazione per le persone e per l'edificio tramite la seguente formula:

$$q_{tot} = n \cdot q_p + A_r \cdot q_B \quad (3.1)$$

Con:

q_{tot} = portata di ventilazione [L/s]

n = numero di persone previste nel locale

q_p = portata di ventilazione per persona [L/s]

A_r = superficie pavimento della stanza [m^2]

q_B = portata di ventilazione necessaria per le emissioni dell'edificio [L/(s m^2)]

I valori di q_p e q_B sono riportati in tabella 3.3. Rispetto ai progressi compiuti nella UNI 10339, nella norma UNI EN 16798-1 viene fatto un ulteriore passo avanti in quanto la portata di ventilazione oltre a dipendere dalle persone dipende anche dalla superficie dell'ambiente.

2. **Metodo che utilizza valori limite per la concentrazione dell'inquinante:** il tasso di ventilazione di progetto necessario per diluire una singola sostanza (ad esempio la CO_2) deve essere calcolato come segue :

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,o}} \cdot \frac{1}{\epsilon_v} \quad (3.2)$$

Con:

Q_h = tasso di ventilazione [m^3/s]

G_h = tasso di generazione della sostanza nell'ambiente [mg/s]

$C_{h,i}$ = valore limite della sostanza nell'ambiente [mg/ m^3]

$C_{h,o}$ = valore della sostanza nell'aria in ingresso [mg/ m^3]

ϵ = efficacia rimozione contaminante, corrisponde a ϵ^c [-]

3. **Metodo basato su portate d'aria di ventilazione predefinite:** si tratta di un metodo per determinare una portata minima di ventilazione predefinita, stimata per soddisfare i requisiti di qualità dell'aria percepita e di salute nella zona occupata.

Categoria	Portata per persona [L/s]		Portata per superficie [L/(s m ²)]		
	q_p		q_B		
	Non adattata	Adattata	VLPB	LPB	NLPB
I	10	3,5	0,5	1	2,0
II	7	2,5	0,35	0,7	1,4
III	4	1,5	0,2	0,4	0,8
IV	2,5	1	0,15	0,3	0,6

Tabella 3.3 Portate di ventilazione negli ambienti scolastici conformemente alla norma UNI EN 16798-1 [21]

Come illustrato nella tabella 3.3, la norma introduce 4 categorie dalla più alta (I) alla più bassa (IV). Inoltre la portata q_p viene divisa per persone adattate e non all'ambiente; nel caso non adattato sono definite le portate di ventilazione necessarie per evitare che quando una persona entra in una stanza non senta cattivi odori o percepisca aria "viziata". Inoltre gli edifici vengono suddivisi in 3 categorie: VLPB (Very Low Polluting Building), LPB (Low Polluting Building) e NLPB (non Low Polluting Buildg). Questa suddivisione serve per dare dei valori di portata in base al grado di inquinamento emesso dall'edificio, che saranno più alte per edifici molto emissivi NLPB e più basse per edifici poco emissivi LPB.

Categoria	Concentrazione di CO ₂ [ppm] al di sopra di quella esterna
I	550
II	800
III	1350
IV	1350

Tabella 3.4 Concentrazioni di CO₂ all'interno del locale per 4 tipologie di categorie secondo UNI EN 16798-1 [21]

La norma prosegue con la classificazione delle concentrazioni di CO₂ in ppm al di sopra della concentrazione esterna per le quattro categorie (tabella 3.4).

3.1.4 Criteri Ambientali Minimi - CAM

I Criteri Ambientali Minimi CAM [34] sono stati aggiornati di recente con la loro nuova versione uscita il 23 giugno 2022. I CAM sono i requisiti definiti dal Ministero della Transizione Ecologica per le varie fasi del processo di acquisto, volti a individuare le forniture e i servizi migliori sotto il profilo ambientale lungo il ciclo di vita. La loro applicazione sistematica e omogenea consente di diffondere le tecnologie ambientali e i prodotti ambientalmente preferibili e produce un effetto leva sul mercato, inducendo gli operatori

economici meno virtuosi ad adeguarsi alle nuove richieste della pubblica amministrazione. Questi criteri considerano la salubrità quale valore aggiunto di una progettazione non basata soltanto su una somma di tecnologie, ma su un insieme dialogante tra materiali a basso impatto ambientale (rinnovabili, durevoli, riutilizzabili, riciclabili) e le conoscenze tecnologiche che sono attualmente a disposizione.

La filosofia che sta alla base dei CAM è quella che gli edifici pubblici devono essere belli, prestanti e poco inquinanti in modo da dare l'esempio alla società. Per tutte le nuove costruzioni, demolizione e ricostruzione, ampliamento e sopra elevazione e le ristrutturazioni importanti di primo livello è necessario garantire le portate d'aria definite dall'UNI 10339 o almeno della classe II VLPB della UNI EN 16798-1. Sempre nel caso di ristrutturazioni, qualora sia complicato ottenere questi livelli di ventilazione, è necessario garantire almeno la classe III VLP della UNI EN 16798-1. I CAM sono di fatto degli obblighi di legge da rispettare per i nuovi edifici o le ristrutturazioni importanti di edifici già esistenti.

3.2 Inquinanti da monitorare

L'aria è composta da oltre 200-300 inquinanti da monitorare. Pertanto la qualità dell'aria e la concentrazione di agenti inquinanti all'interno degli edifici scolastici è influenzata da una moltitudine di fattori complessi che interagiscono fra di loro.

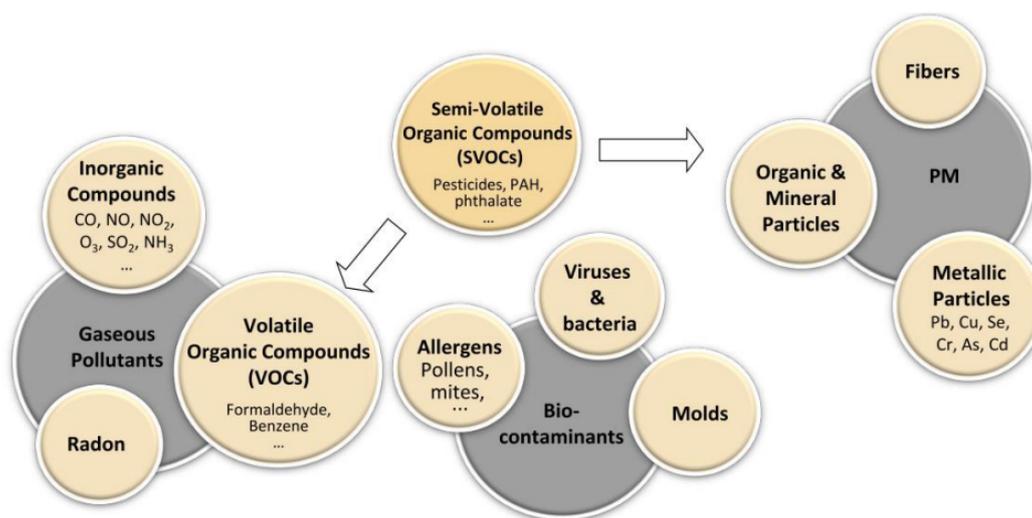


Figura 3.3 Classificazione degli inquinanti indoor [15]

Il carico ambientale delle aule è rappresentato da:

- sostanze derivanti dal metabolismo come anidride carbonica (CO_2) e numerosi composti organici, virus e batteri liberati nell'aria attraverso la respirazione.
- Inquinanti derivati da fonti interne come materiali edili, arredi, materiali scolastici, prodotti per la pulizia, ecc.
- Sostanze inquinanti provenienti dall'esterno.

La vicinanza dell'edificio scolastico a strade trafficate o zone industriali determina una maggiore concentrazione nell'aria di inquinanti quali PM_{10} , NO_2 e particelle ultrafini.

3.2.1 Anidride carbonica

L'anidride carbonica CO_2 è una gas incolore inodore, composto da una parte di carbonio e due di ossigeno. È un prodotto di scarto che viene prodotto anche dall'uomo tramite la respirazione cellulare. I tassi di emissione possono cambiare a seconda delle età e

dell'attività fisica che l'individuo sta svolgendo (vedi figura 4.8).

Il contenuto di CO₂ nell'aria esterna è pressoché costante a scapito di una variazione di pochi ppm a causa dei cicli vegetali dei due emisferi. Attualmente nel mondo la concentrazione di CO₂ esterna minima è di circa 420 ppm [16] e può essere talvolta superiore a questo valore (per esempio in ambienti urbani), ma mai inferiore.

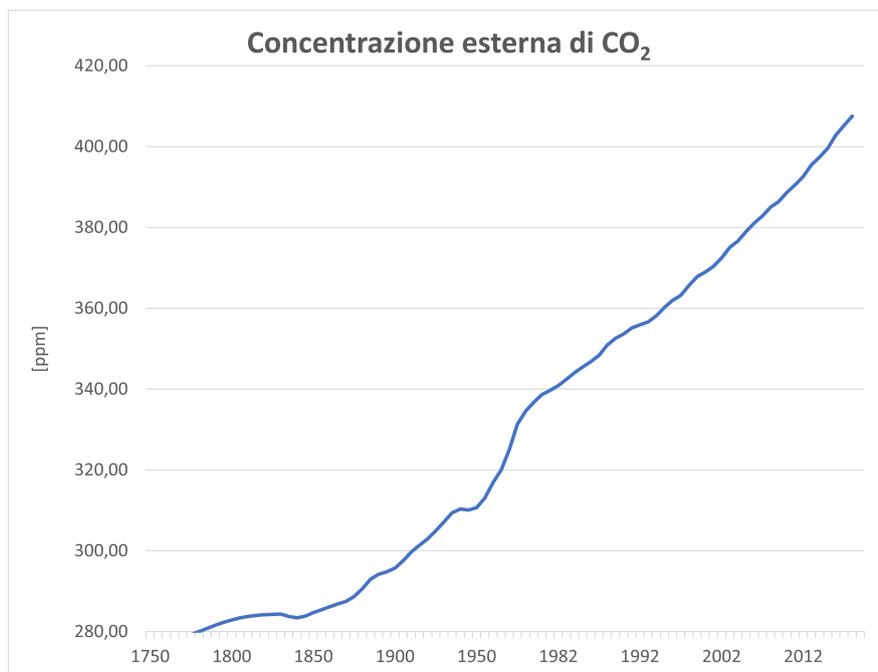


Figura 3.4 Concentrazione di CO₂ esterna negli anni, dati presi da *European Environment Agency* (EEA) [16]

Nei locali chiusi, il livello di concentrazione di CO₂ rappresenta un buon indicatore della qualità dell'aria poiché il suo livello nell'aria aumenta in modo proporzionale rispetto a tutte le altre sostanze. La concentrazione di CO₂, quindi, non viene misurata perché più pericolosa rispetto ad altre sostanze, ma perché permette di quantificare facilmente il carico ambientale dell'aria delle aule e valutare il ricambio di aria. L'incremento consistente di CO₂ nelle aule è dovuto principalmente all'elevato affollamento, il tempo di permanenza e al tasso di ventilazione non adeguato. Per un ambiente salubre e buone condizioni di apprendimento, il livello di CO₂ nelle aule scolastiche non dovrebbe mai superare i 1200 ppm.

La curva in figura 3.5 è stata generata attraverso il tool open-source fornito da QAES [17]. Nell'esempio viene simulata un'ora di lezione in un'aula che nell'ora precedente non era stata occupata. Come C_{ext} è stato impostato quindi il valore di 420 ppm. Come tasso di generazione della CO₂ è stato usato quello per la fascia di età 11-16 anni.

Si nota come la concentrazione CO₂ in assenza di un impianto VMC aumenti in modo molto marcato fino a raggiungere valori non accettabili di 2300 ppm. La discesa rappre-

senta gli ultimi 10 minuti di lezione in cui sono stati aperti i serramenti, che comunque non fanno scendere sufficientemente la CO₂, il cui valore rimane intorno ai 1000 ppm.

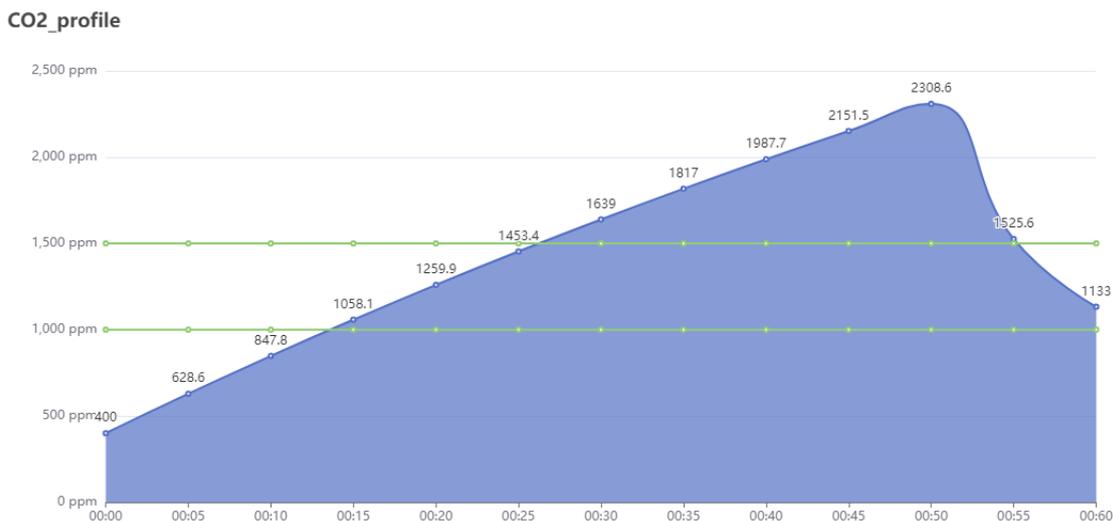


Figura 3.5 Andamento qualitativo di CO₂ durante un'ora di lezione. Grafico generato dal tool open-source QAES [17]

La European Collaborative Action (ECA) è giunta ai seguenti livelli di insoddisfazione sulla base di una serie di calcoli e di modelli. A partire da 1000 ppm, si prevede che circa il 20% degli utenti della stanza sia insoddisfatto, con un aumento fino a circa il 36% a 2000 ppm.

Diversi Paesi hanno fissato tramite pubblicazioni ufficiali linee guida e raccomandazioni per la ventilazione di edifici e di conseguenza i valori limite di CO₂ da non superare per gli ambienti interni. Nella tabella in figura 3.6 sono elencati i limiti fissati dai Paesi europei e in figura 3.7 quelli extra-europei.

Come si può notare, in Italia, non esiste ancora una legge o una normativa specifica che stabilisca un valore massimo consentito di CO₂ negli ambienti interni.

Paese	Valore guida	Rif.
Paesi europei		
	VR: 2.160 mg/m³ (1.200 ppmv)	15
Finlandia	S1 1.300 mg/m³ (700 ppmv); S2 1.650 mg/m³ (900 ppmv); S3 2.200 mg/m³ (1.200 ppmv)	16
Francia	1.800 mg/m³ (1.000 ppmv)	17, 18
	VR: 1.800 mg/m³ (1.000 ppmv)	11
Germania	< 1.800 mg/m³ (1.000 ppmv) concentrazione innocua; tra 1800 mg/m³ (1000 ppmv) e 3600 mg/m³ (2000 ppmv) concentrazione elevata; > 3600 mg/m³ (2000 ppmv) concentrazione inaccettabile	9, 10
Norvegia	VR: 1.800 mg/m³ (1.000 ppmv)	19
Paesi Bassi	scuole: 2.160 mg/m³ (1.200 ppmv)	20
Portogallo	1.800 mg/m³ (1.000 ppmv) 2.250 mg/m³ (1.250 ppmv)	21, 22
	VR: 1.440 mg/m³ (800 ppmv) Inoltre, se è presente il controllo della CO ₂ : 1.800 mg/m³ (1.000 ppmv), livello usato se l'obiettivo è il risparmio energetico; 1.080 mg/m³ (600 ppmv), livello usato se l'obiettivo è quello di una buona qualità dell'aria	14
Regno Unito	scuole: 2.700 mg/m³ (1.500 ppmv) concentrazione media nella giornata scolastica	12
	scuole: 8.980 mg/m³ (5.000 ppmv) concentrazione media nella giornata scolastica 1.800 mg/m³ (1.000 ppmv)	13

Figura 3.6 Valori guida della CO₂ in ambiente indoor nelle legislazioni dei diversi Paesi europei [18]

Paese	Valore guida	Rif.
Paesi extra-europei		
Brasile	1.800 mg/m³ (1.000 ppmv)	32, 33
Canada	6.300 mg/m³ (3.500 ppmv)	30
	1.800 mg/m³ (1.000 ppmv)	30
Giappone	scuole: 2.700 mg/m³ (1.500 ppmv) concentrazione media nella giornata scolastica	35, 36
Hong Kong*	1.440-1.800 mg/m³ (800-1.000 ppmv) per 8 ore	37
Repubblica di Corea	1.800 mg/m³ (1.000 ppmv)	34
Singapore	1.800 mg/m³ (1.000 ppmv) per 8 ore	31
	ASHRAE 1.800 mg/m³ (1.000 ppmv)	23-28
Stati Uniti	Secondo lo standard ASHRAE 62:2001 il valore limite per l'accettabilità della qualità dell'aria <i>indoor</i> è stabilito pari ad una differenza fra concentrazione di CO ₂ interna ed esterna di 1260 mg/m³ (700 ppmv) e corrisponde a condizioni di ventilazione ritenute disagioli da circa il 20% delle persone presenti.	
	Illinois 1.800 mg/m³ (1.000 ppmv)	29
Taiwan	1.800 mg/m³ (1.000 ppmv)	38

Figura 3.7 Valori guida della CO₂ in ambiente indoor nelle legislazioni dei diversi Paesi extra-europei [18]

3.2.2 Radon

Il radon è un gas radioattivo incolore, inodore e insapore che si forma naturalmente a partire dalla decomposizione dell'uranio radioattivo presente nel suolo, nelle rocce e nelle acque sotterranee. Il radon può penetrare all'interno degli edifici attraverso le crepe e le fessure presenti nelle fondamenta e nei pavimenti. Poiché è un gas pesante, il radon tende a accumularsi nei livelli inferiori degli edifici, specialmente nei seminterrati e nei piani interrati. Il radon è classificato come un agente cancerogeno dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e dall'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC). Solitamente, per mitigare la presenza di radon si ricorre a soluzioni strutturali che consistono nella sigillatura che impedisca l'ingresso del Radon nell'edificio oppure aumentare il ricambio dell'aria interna attraverso l'immissione di aria da fuori.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) raccomanda di non superare il livello di riferimento di 100 Bq/m³.

3.2.3 Composti organici volatili - COV

I COV sono sostanze chimiche presenti nell'aria emesse da prodotti per la pulizia, deodoranti per ambienti, mobili e materiali da costruzione o da dispositivi elettronici come i computer. Le concentrazioni di COV sono fino a 10 volte superiori all'interno rispetto all'esterno. Le concentrazioni possono essere più elevate per i nuovi edifici, soprattutto quelli nuovi, sempre più ermetici. Questo ha portato ad avere concentrazioni interne di COV maggiori rispetto al passato.

I principali sintomi a breve termine associati a un'eccessiva esposizione ai COV includono mal di testa, irritazione o infiammazione a naso, gola e occhi, mentre i sintomi a lungo termine includono malattie cardiovascolari, malattie respiratorie o effetti più gravi al fegato, milza e reni.

Come illustrato in uno studio [35] si può fare riferimento alla seguente classificazione:

- 0 ppb (parti per miliardo) < x < 250 ppb: i livelli di COV sono buoni
- 250 ppb < x < 2000 ppb: livello di attenzione
- x > 2500 ppb: livello di rischio

Formaldeide

La formaldeide fa parte della classe dei COV ed è un composto chimico organico con formula chimica HCHO, noto anche come aldeide formica. Si presenta come un gas

incolore dall'odore acre e irritante, altamente volatile e facilmente infiammabile.

Nelle scuole, la formaldeide può essere presente in vari materiali da costruzione e arredi, come mobili, pavimenti, rivestimenti murali, soffitti sospesi, isolamenti termici, adesivi e sigillanti. In particolare, i mobili e le pareti in truciolare o MDF (Medium-Density Fiberboard), che sono comunemente utilizzati nelle scuole, possono contenere formaldeide in quanto spesso prodotti con colle a base di formaldeide. Inoltre, la formaldeide può anche essere presente in prodotti per la pulizia, come detersivi per pavimenti e bagni. La formaldeide può causare problemi di salute quali: irritazione delle mucose degli occhi, irritazione delle vie respiratorie e della pelle. L'esposizione per mesi o anni può causare diminuzione della funzionalità polmonare e aumento del rischio di infezioni croniche delle vie respiratorie.

L'aumento della concentrazione della formaldeide è correlata alla temperatura e all'umidità dell'aria nella stanza.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) raccomanda un valore limite di 0,08 ppm per l'esposizione alla formaldeide nell'aria interna per un periodo di 30 minuti.

3.2.4 Particolato

Un aerosol è definito nella sua forma più semplice come una serie di particelle solide o liquide sospese in un gas mentre il termine particolato (particulate matter, PM) individua l'insieme dei corpuscoli di tale miscela. Il particolato atmosferico si fa riferimento al complesso e dinamico insieme di particelle, con l'esclusione dell'acqua, disperse in atmosfera per tempi sufficientemente lunghi da subire fenomeni di diffusione e trasporto.

Le principali sorgenti antropiche di particelle primarie sono i processi di combustione negli impianti domestici di riscaldamento alimentati a biomassa legnosa, i veicoli dotati di motore a combustione interna e le attività industriali.

Le particelle nell'intervallo di diametro tra 0,01 e 100 μm sono quelle che rivestono un maggior interesse data la possibilità di essere inalate. Per PM10 si intende la frazione di particelle raccolte con un sistema di selezione avente efficienza pari al 50% per il diametro aerodinamico di 10 μm , stesso discorso viene poi fatto per i PM5 e i PM2,5.

Da uno studio condotto all'interno di una scuola [36] si è notato come il PM10 è maggiore dentro alle classi rispetto all'esterno nonostante è proprio all'esterno che viene generato dai processi di combustione. Questo è dovuto al fatto che il particolato più grossolano viene messo in risospensione dall'attività umana e nello studio appunto si nota come l'andamento interno temporale della CO₂ e del PM10 siano molto simili.

Capitolo 4

Metodologia: Casi studio e Modelli

Come accennato in precedenza, questo lavoro di tesi mira a ottimizzare la ventilazione meccanica nelle aule scolastiche mettendo a confronto due sistemi di ventilazione. In particolare, analizzando due soluzioni che possono adattarsi bene agli edifici già esistenti in quanto l'Italia ha un parco edilizio di scuole che deve necessariamente aggiornarsi agli standard europei e mondiali.

1. La prima soluzione riguarda la **ventilazione a completa miscelazione MV** realizzata tramite le unità decentralizzate poste nelle singole aule. Questa soluzione è tutt'oggi la più flessibile in quanto le unità decentralizzate possono essere facilmente installate senza la necessità di posare canali dell'aria o dover apportare ristrutturazioni importanti all'immobile, riducendo così costi e tempi di installazione.
2. La seconda soluzione è la **ventilazione a dislocamento DV**. Si tratta di una soluzione progettuale più raffinata rispetto alla precedente, perfettamente compatibile con la progettazione di un edificio nuovo. Nonostante questo, però, può essere integrata bene anche negli edifici esistenti tramite unità decentralizzata e canali dell'aria per servire i dislocatori presenti nella stanza.

In questo capitolo verranno dapprima descritti i casi studio con le loro caratteristiche geometriche, successivamente verrà spiegato come questi sono stati implementati su un software CFD e le relative condizioni al contorno utilizzate.

4.1 Casi studio

Inizialmente si è condotta un'analisi su più di 150 scuole situate nei comuni di Livorno e Reggio Emilia con l'obiettivo di creare un modello di "aula tipo" sul quale studiare i due sistemi di ventilazione. I risultati ottenuti sono elencati nella tabella 4.1.

Aula scolastica tipo	
F [-]	1,25
Area calpestabile [m ²]	50
Lunghezza lato lungo [m]	8
Lunghezza lato corto [m]	6,3
Area superficie vetrata [m ²]	7

Tabella 4.1 Dati geometrici di una "aula tipo"

Con F è indicato il fattore di forma delle aule, ovvero il rapporto tra lunghezza e larghezza. In questo campione statistico quindi le aule presentavano mediamente una lunghezza maggiore di 1,25 volte la larghezza. Questo porta ad avere un lato lungo di circa 8m e un lato corto di 6,3m.

Dato che l'altezza dell'aula è un parametro che influenza fortemente il funzionamento dei due sistemi di ventilazione (MV e DV) si è deciso di prendere due misure differenti. La prima di 2,7m (la più comune) e la seconda di 3,5m che si trova spesso negli edifici di vecchia costruzione. Ricapitolando quindi, i casi studio sono quattro in totale e sono riassunti in maniera schematica in tabella 4.2.

Casi studio	
Sistema di ventilazione meccanica	Altezza dell'aula [m]
Ventilazione a completa miscelazione (MV)	2,7
	3,5
Ventilazione a dislocamento (DV)	2,7
	3,5

Tabella 4.2 Tabella riassuntiva casi studio

Per quanto riguarda il numero di studenti si considera la condizione peggiorativa, ovvero l'affollamento massimo previsto dal D.M. 1975, il quale limita a 25 il numero massimo di studenti per aula. Quindi nella stanza saranno presenti un totale di 26 persone, 25 studenti e un insegnante. Di seguito verranno mostrati i modelli utilizzati sia per MV che per DV,

che sono stati creati su **oneshape**, un software di modellazione 3D o di progettazione CAD che consente di creare modelli digitali di oggetti tridimensionali.

4.1.1 Modelli con ventilazione a completa miscelazione MV

La figura 4.1 illustra lo spaccato dell'aula con altezza 2,7 m per il caso MV.

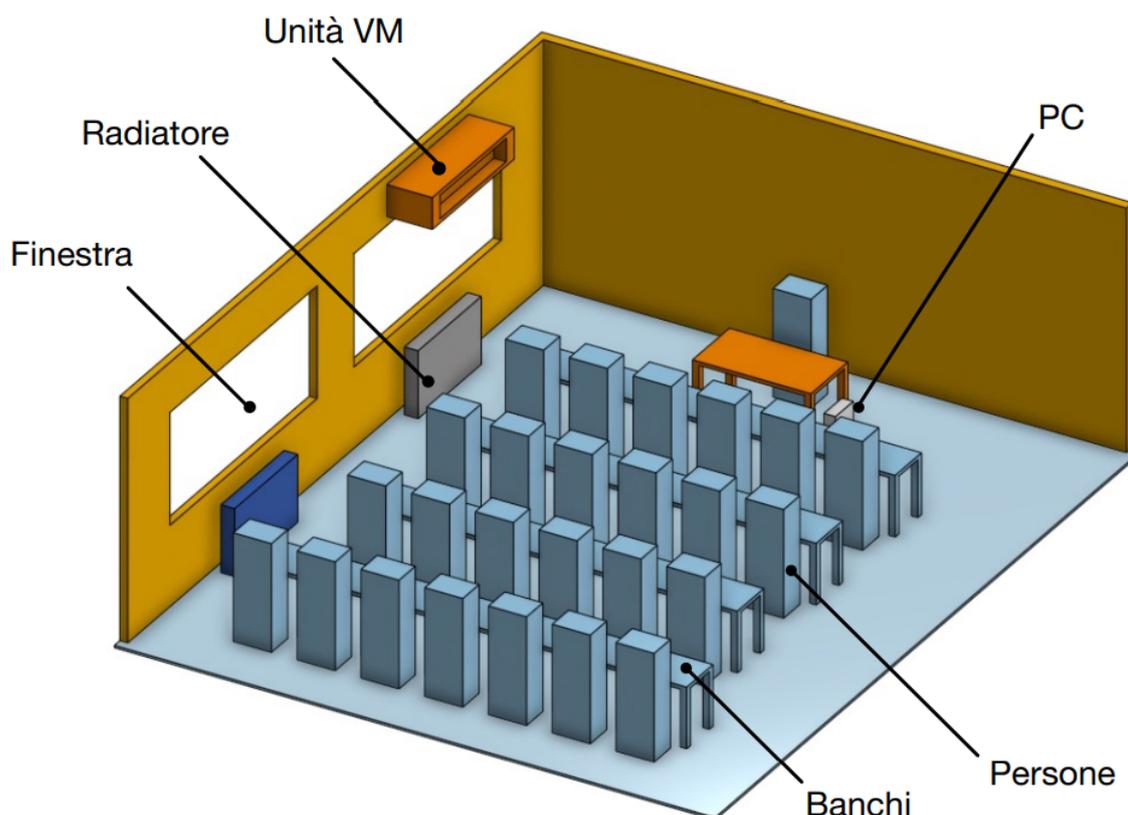


Figura 4.1 Modello 3D di una "classe tipo" con unità decentralizzata per MV

Per ricreare un'unità decentralizzata in MV, sono stati consultati diversi cataloghi di diversi costruttori di macchine simili ed è stata fatta una media delle dimensioni. L'unità è stata posizionata sulla parete esterna sopra la finestra in quanto si tratta della configurazione più usuale per facilità di installazione e costi.

Solitamente i costruttori di queste unità prevedono che l'estrazione sia fatta sulla macchina stessa, questa soluzione pur essendo economica rischia di mandare in cortocircuito l'aria che viene immessa con l'espulsione, penalizzando le prestazioni dell'impianto. Sulla base di queste considerazioni, la bocchetta di ripresa è stata inserita sul muro opposto a quello dell'unità di ventilazione così da ottenere un'estrazione dell'aria più efficiente e centralizzata sul corridoio della scuola.

Le persone all'interno dell'aula (insegnante e studenti) sono stati schematizzati come dei rettangoli per non complicare il modello e i tempi computazionali. È stata scelta una disposizione a banchi uniti su 4 file. Nell'aula sono previsti anche due radiatori nella loro usuale posizione sotto le finestre per bilanciare i flussi discendenti di aria fredda. Per avere una simulazione più realistica, all'interno del modello sono stati disegnati i banchi e la cattedra in quanto essi costituiscono un ostacolo ai moti dell'aria e infine un PC dell'insegnante dato che, essendo una fonte di calore, influirà sulle forze di galleggiamento dell'aria. Il modello di MV con altezza dell'aula è uguale, l'unica cosa che cambia è l'altezza delle pareti.

4.1.2 Modello con ventilazione a dislocamento DV

In figura 4.2 è rappresentato lo spaccato dell'aula con altezza 2,7 m per il caso DV.

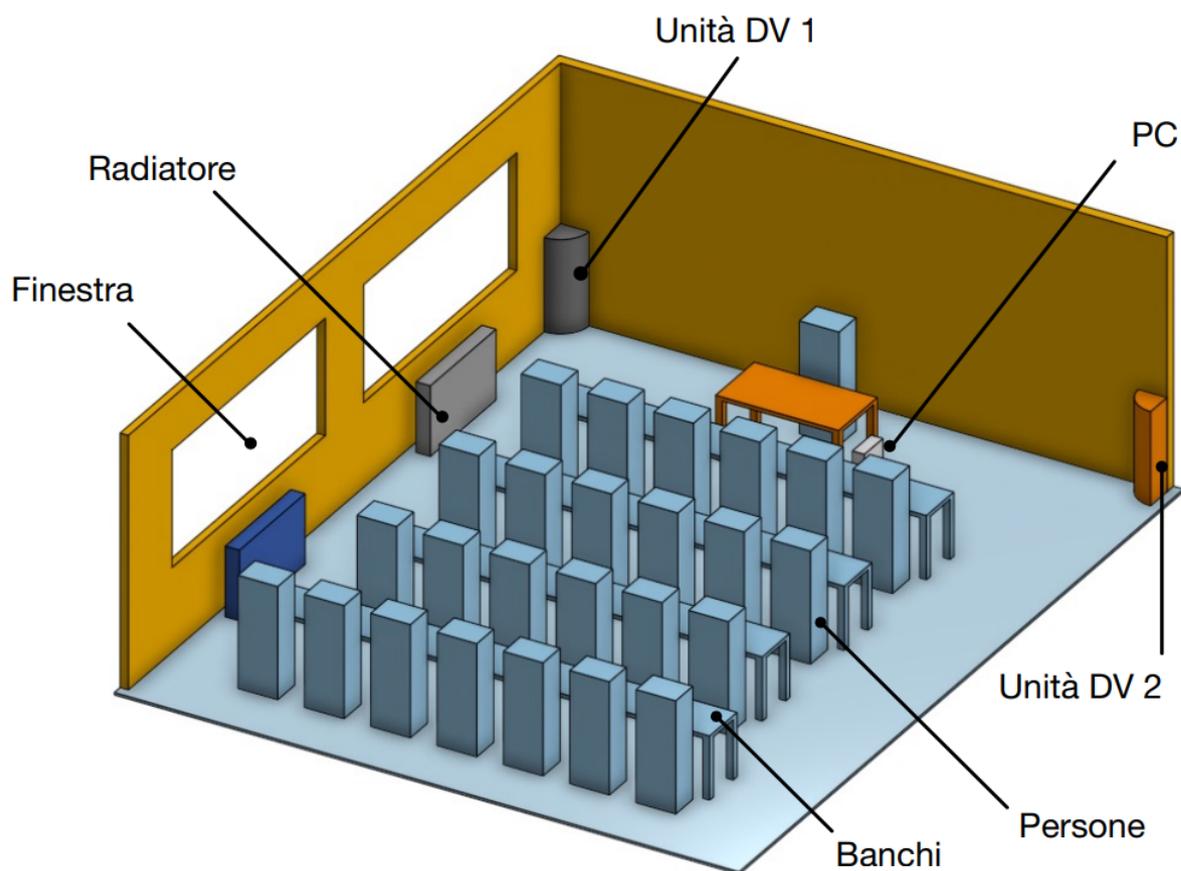


Figura 4.2 Modello 3D di una "classe tipo" con le unità a dislocamento per DV

Il modello è uguale a quello della figura 4.1 ad eccezione del sistema di ventilazione. Questa volta al posto dell'unità decentralizzata MV sono stati inseriti due dislocatori ad

angolo nei lati della stanza in modo da cercare di spargere il più omogeneamente possibile l'aria pulita all'interno della stanza. Questa tipologia di dislocatori sono fatti in modo da indirizzare l'immissione dell'aria lungo le pareti per evitare il rischio di correnti d'aria a pavimento nella zona occupata (figura 4.3).

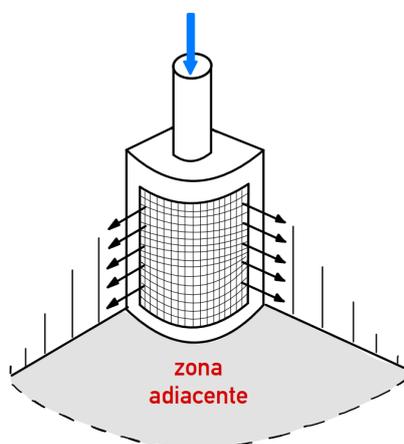


Figura 4.3 Modello del dislocatore scelto con relativa zona di prossimità

Anche per le dimensioni dei dislocatori sono stati confrontati diversi cataloghi di diversi costruttori e le loro dimensioni sono in funzione della portata. La loro posizione è stata studiata in modo da cercare di non creare fastidi per *draught rate*, e quindi la zona ideale per la loro installazione si è rivelata agli angoli della parete dove risiede l'insegnante. Con questo tipo di ventilazione l'inserimento dei banchi è essenziale in quanto la distribuzione dell'aria immessa dai dislocatori a livello del pavimento è fortemente influenzata dagli ostacoli che trova lungo il suo percorso. Ovviamente non devono essere presenti ostacoli subito in prossimità di essi come armadi, arredi o anche la porta stessa.

4.2 Computational fluid dynamics - CFD

La fluidodinamica computazionale (CFD) è il processo di modellazione matematica di un fenomeno fisico che coinvolge il flusso dei fluidi e la sua risoluzione numerica grazie alle capacità di calcolo. Con l'avvento dei computer e la crescente potenza di calcolo, il campo della fluidodinamica computazionale è diventato uno strumento comunemente applicato per generare soluzioni per flussi fluidi con o senza interazione con i solidi. In un'analisi software CFD, si esamina il flusso del fluido in base alle sue proprietà fisiche, quali velocità, pressione, temperatura, densità e viscosità. Per generare virtualmente una soluzione accurata per un fenomeno fisico associato al flusso del fluido, tali proprietà devono essere considerate simultaneamente.

La CFD è ampiamente utilizzata in molti campi, come l'ingegneria aerospaziale, navale, meccanica, elettromeccanica e la scienza dei materiali, al fine di prevedere il comportamento dei fluidi in situazioni specifiche e ottimizzare le prestazioni di progetti o dispositivi che influenzano il flusso dei fluidi.

La convergenza è un problema importante per l'analisi computazionale. Il movimento del fluido è descritto da equazioni matematiche non lineari con vari modelli complessi come la turbolenza, il cambiamento di fase e il trasferimento di massa e la convergenza è fortemente influenzata da questi. Oltre alla soluzione analitica, la soluzione numerica passa attraverso uno schema iterativo in cui i risultati sono ottenuti dalla riduzione degli errori tra le fasi precedenti. Le differenze tra gli ultimi due valori specificano l'errore. Quando l'errore assoluto è decrescente, l'affidabilità del risultato aumenta, il che significa che il risultato converge verso una soluzione stabile.

La convergenza deve continuare fino a quando non si ottiene una condizione di stato stazionario, il che indica risultati che cambiano nel tempo. I residui delle equazioni cambiano a ogni iterazione. Quando le iterazioni si riducono a un valore di soglia, si raggiunge la convergenza.

La struttura principale del comportamento dei termofluidi è diretta dalle equazioni di governo che si basano sulla legge di conservazione delle proprietà fisiche del fluido. Le equazioni fondamentali sono le tre leggi di conservazione:

- Conservazione della massa: Equazione di continuità
- Conservazione della quantità di moto: Seconda legge di Newton
- Conservazione dell'energia: Prima legge della termodinamica o equazione dell'energia.

Questi principi affermano che la massa, la quantità di moto e l'energia sono costanti stabili all'interno di un sistema chiuso. In pratica, tutto deve essere conservato.

4.2.1 Solutore CFD

Il solutore CFD utilizzato è *Simscale* [37] ovvero una piattaforma di simulazione ingegneristica cloud-based, ovvero grazie alla quale tutti i calcoli di simulazione vengono eseguiti su server remoti ad alta capacità di elaborazione. Questo approccio consente agli utenti di eseguire analisi di simulazione anche se non dispongono di potenti computer locali.

Simscale offre una vasta gamma di strumenti di simulazione, tra cui la dinamica dei fluidi computazionale (CFD), la meccanica dei solidi, la dinamica dei corpi rigidi e la

termo-fluidodinamica. Ciò consente agli utenti di simulare una vasta gamma di problemi ingegneristici, dalla progettazione di automobili e aeromobili all'analisi di flussi di liquidi e gas in una vasta gamma di applicazioni industriali e civili.

Una delle principali caratteristiche di Simscale è la sua interfaccia utente intuitiva e facile da usare, che permette agli utenti di configurare facilmente le loro simulazioni e di visualizzare i risultati in modo chiaro e comprensibile. In aggiunta la piattaforma offre inoltre un'ampia gamma di strumenti di post-elaborazione e di visualizzazione dei dati, tra cui grafici, mappe termiche e animazioni.

4.2.2 Modello di turbolenza

I solutori CFD risolvono l'equazione di conservazione della massa, di quantità di moto e di energia. Dato che la maggior parte dei flussi d'aria sono turbolenti, possono essere utilizzati due diversi approcci: *Large Eddy Simulation* (LES) e *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS). Il primo approccio è molto preciso ma troppo costoso a livello computazionale e quindi, nelle soluzioni industriali viene preferito il secondo. L'approccio RANS si basa sulla scomposizione di ogni grandezza governata dal flusso in due parti, una mediata nel tempo e una fluttuante. Un'esempio è la velocità $u = \bar{u} + u'$, che viene divisa in due componenti, la velocità mediata nel tempo \bar{u} e la parte fluttuante u' (figura 4.4).

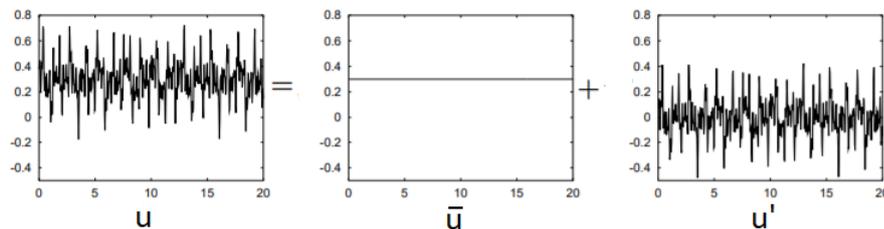


Figura 4.4 Decomposizione di una grandezza in parte media e in parte fluttuante

Mediando le equazioni di Navier-Stokes nel tempo e utilizzando questa scomposizione si ottengono le equazioni Reynolds Averaged Navier-Stokes.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} + \nabla \bar{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \nu \Delta \bar{u} - \nabla \cdot (\overline{u'u'}) \quad (4.2)$$

Scritte così le equazioni non hanno una soluzione unica perché non sono in forma chiusa, essendo le incognite superiori alle equazioni. Pertanto, sono necessarie equazioni aggiuntive per avere il problema in forma chiusa. La strategia più comunemente utilizzata nella CFD è quella di mettere in relazione lo sforzo di Reynolds $\overline{u'u'}$ con la velocità di taglio

mediante la relazione di *Boussinesq*:

$$\overline{u'u'} = \nu_T \nabla^S \bar{u} \quad (4.3)$$

Dove ν_T rappresenta la viscosità turbolenta e ∇^S l'operatore gradiente simmetrico. Durante gli anni sono stati sviluppati diversi modelli RANS.

Per lo studio di questo elaborato si è utilizzato il modello **k-omega SST**.

Il modello di turbolenza k-omega ($k-\omega$) è uno dei modelli più comunemente utilizzati per simulare le condizioni di flusso turbolento. È un modello a due equazioni. Questo significa che, oltre alle equazioni di conservazione, risolve due equazioni di trasporto (PDE), che tengono conto degli effetti storici come la convezione e la diffusione dell'energia turbolenta. Le due variabili trasportate sono l'energia cinetica turbolenta (k), che determina l'energia nella turbolenza, e il tasso specifico di dissipazione turbolenta (ω), che determina il tasso di dissipazione per unità di energia cinetica turbolenta. ω è anche indicato come la scala della turbolenza.

Il modello standard k- ω è un modello a basso Re, cioè può essere utilizzato per flussi con basso numero di Reynolds in cui lo strato limite è relativamente spesso e il sottostato viscoso può essere risolto. Pertanto questo modello si presta molto bene per il trattamento delle pareti.

SST sta per trasporto dello sforzo di taglio. Il modello k- ω SST fornisce una migliore previsione della separazione del flusso rispetto alla maggior parte dei modelli RANS e spiega anche il suo buon comportamento in caso di gradienti di pressione avversi. È in grado di tenere conto del trasporto dello sforzo di taglio principale negli strati limite con gradiente di pressione sfavorevole. È il modello più comunemente utilizzato nel settore, dato il suo elevato rapporto tra accuratezza e costi [38].

L'energia turbolenta k è definita come:

$$k = \frac{3}{2} (\bar{u}I)^2 \quad (4.4)$$

dove I è l'intensità di turbolenza.

$$I = \frac{u'}{\bar{u}} \quad (4.5)$$

Il tasso di dissipazione turbolenta specifico può essere calcolato con la seguente formula:

$$\omega = C_\mu^{3/4} \frac{k^{1/2}}{l} \quad (4.6)$$

dove C_μ è la costante del modello di turbolenza che di solito assume il valore 0.09, k è l'energia turbolenta, l è la scala di lunghezza turbolenta che descrive la dimensione dei grandi vortici contenenti energia in un flusso turbolento. Infine la viscosità turbolenta ν_T

viene calcolata come:

$$v_T = \frac{k}{\omega} \quad (4.7)$$

4.2.3 Mesh

Per definizione, una **mesh** è una rete che divide lo spazio in una serie di piccoli elementi tridimensionali o bidimensionali chiamati celle. Può avere qualsiasi forma e qualsiasi dimensione e viene utilizzata per risolvere le equazioni differenziali parziali. Ogni cella della maglia rappresenta una soluzione individuale dell'equazione che, combinata per l'intera rete, dà come risultato la soluzione dell'intera maglia.

Il primo passo per risolvere numericamente un insieme di equazioni differenziali parziali (PDE) è la discretizzazione delle equazioni e la discretizzazione del dominio del problema. Il processo di discretizzazione delle equazioni è legato a metodi come il Metodo delle differenze finite, il Metodo dei volumi finiti (FVM) e il Metodo degli elementi finiti, il cui scopo è prendere le equazioni in forma continua e generare un sistema di equazioni algebriche alle differenze.

Ogni punto della mesh rappresenta un grado di libertà, ovvero un parametro che può essere variato indipendentemente dagli altri. Il valore di queste variabili in ogni punto determina le proprietà del fluido in quella regione. La risoluzione e la densità della mesh influenzano la precisione e l'accuratezza delle soluzioni CFD, ma anche il costo computazionale dell'analisi [39].

La mesh è stata generata direttamente sul software Simscale eliminando il modello del solido da quello del fluido. Il dominio computazionale rappresenta perciò solo fluido. In seguito è stato imposto un *Region refinement* all'interno del volume, in modo che la lunghezza massima del bordo della cella non superi mai 0,1 m. In seguito per "catturare" in maniera più accurata il comportamento del fluido è stata raffinata la mesh con un lunghezza massima di cella di 0,01 m in corrispondenza dell'ingresso e dell'uscita dell'aria dal dominio, come si vede in figura 4.5.

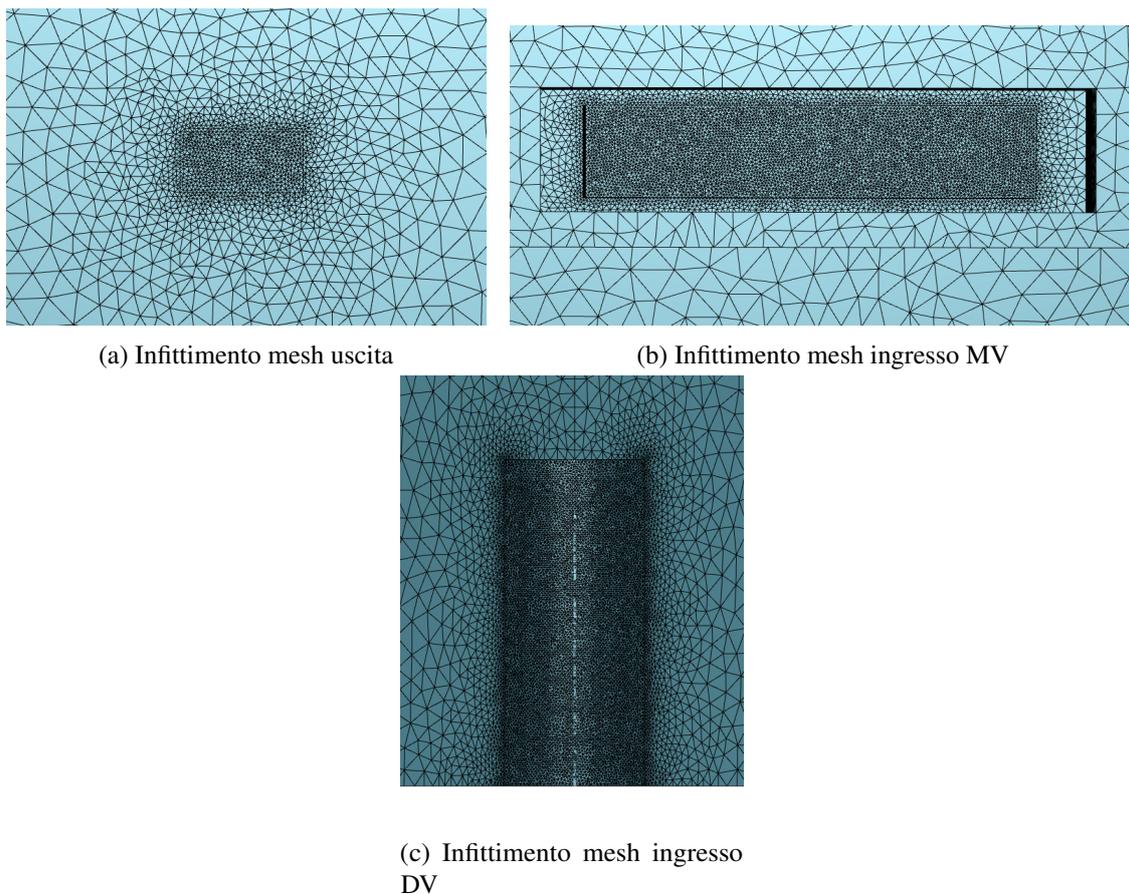


Figura 4.5 Infittimento della mesh localizzato all'uscita e all'ingresso del dominio

Infine è stata ulteriormente infittita la mesh inserendo un *boundary layer* composto da 3 strati con un grow rate di 1,5 sopra ogni superficie in modo da catturare in modo più accurato lo strato limite.

L'algoritmo scelto per la generazione della mesh è quello *standard* disponibile su Simscale. Questo strumento genera una mesh tridimensionale non strutturata utilizzando elementi tetraedrici o esaedrici. Questo tipo di mesh si presta bene a descrivere oggetti con superfici complesse, come ad esempio superfici curvilinee, che non possono essere rappresentati altrettanto bene con altri tipi di mesh. In termini di prestazioni, le mesh polyhedral possono essere più complesse da elaborare rispetto a mesh basate su triangoli o quadrati, in quanto la loro complessità geometrica richiede una maggiore quantità di memoria e potenza di elaborazione.

Tuttavia, questo aumento di complessità può essere giustificato dalla maggiore precisione e accuratezza delle informazioni ricavatesi dall'analisi.

Le figure 4.6 e 4.7 sono due sezioni, la prima è una vista generale del dominio, mentre la seconda si focalizza sull'infittimento della mesh generato in corrispondenza dell'ingresso dell'aria.

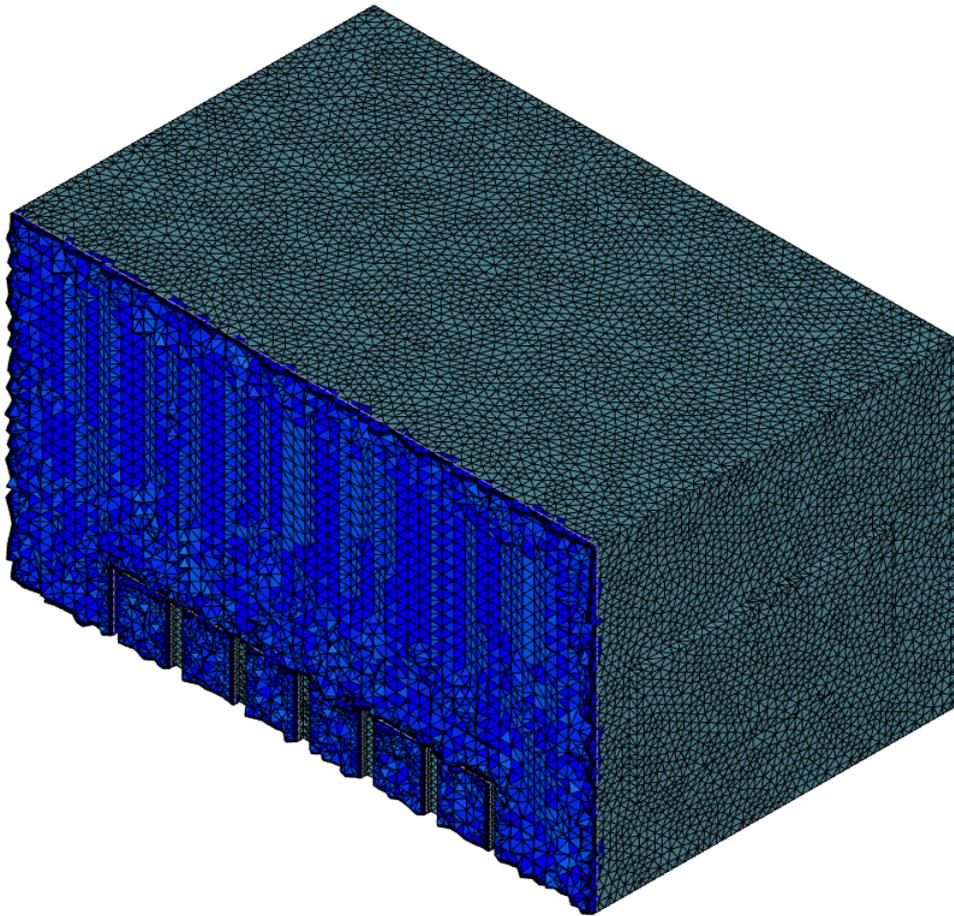


Figura 4.6 Sezione verticale del lato corto della mesh generata sul dominio

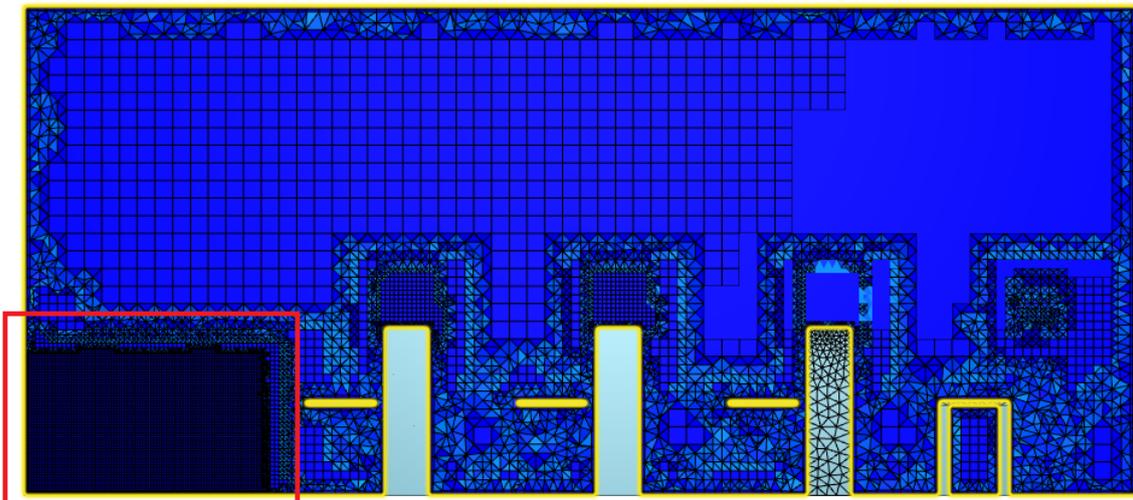


Figura 4.7 Sezione verticale del lato lungo della mesh, nel rettangolo in rosso si vede l'infittimento che è stato computato all'ingresso dell'aria per il caso di DV

In tabella 4.3 sono riassunti il numero di elementi e di nodi delle mesh per le 4 geometrie studiate.

	Modello MV h= 2,7 m	Modello MV h= 3,5 m	Modello DV h= 2,7 m	Modello DV h= 3,5 m
Numero di nodi	1.9 M	2,1 M	2.8 M	3.2 M
Numero di elementi	4,9 M	5,3 M	6.4 M	6.9 M

Tabella 4.3 Numero di elementi e nodi per le 4 geometrie studiate ($M = 10^6$)

4.2.4 Materiali

Come fluido per il dominio computazionale è stata scelta l'aria dalla libreria di Simscales, i dati sono elencati in tabella 4.4.

Aria	
Viscosità cinematica [m^2/s]	0,000015295
Densità [kg/m^3]	1,196
Temperatura di riferimento T_0 [K]	273,1
Numero di Prandtl laminare [-]	0,713
Numero di Prandtl turbolento [-]	0,85
Calore specifico [$J/(kg K)$]	1004

Tabella 4.4 Proprietà dell'aria dalla libreria di Simscales

Per questo tipo di simulazione è stata utilizzata l'ipotesi di fluido incomprimibile in quanto le velocità e le variazioni di pressione sono abbastanza ridotte da giustificare questa scelta.

4.2.5 Condizioni al contorno

In un'analisi CFD, le condizioni al contorno si riferiscono alle specifiche impostazioni che definiscono come il flusso del fluido interagisce con le superfici e le aree di interesse all'interno del dominio di simulazione. In pratica, le condizioni al contorno descrivono le proprietà del flusso (come la velocità, la temperatura, la pressione, la densità, la viscosità, ecc.) in corrispondenza delle superfici del dominio di simulazione. Tali proprietà possono

essere impostate come valori costanti o come funzioni variabili nel tempo o nello spazio, in base alle caratteristiche specifiche del flusso e del problema in esame. Le condizioni al contorno utilizzate sono elencate di seguito:

Ingresso: per quanto riguarda l'ingresso è stata impostata una condizione al contorno sulla velocità, in particolare sulla portata in volume. Per le portate di rinnovo sono state prese quelle del Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975 discusse al capitolo 3 che variano a seconda del tipo di scuola (elementare, media, superiore) e al volume della stanza. Nel nostro caso quindi, a parità di superficie calpestabile, variano in base all'altezza del soffitto. In tabella 4.5 sono riassunte le varie condizioni al contorno di ingresso a seconda dei casi:

	Altezza	
	2,7 m	3,5 m
Elementare	0,09375 [m ³ /s]	0,12153 [m ³ /s]
Media	0,13125 [m ³ /s]	0,17014 [m ³ /s]
Superiore	0,18750 [m ³ /s]	0,24306 [m ³ /s]

Tabella 4.5 Portate in ingresso utilizzate

La temperatura di immissione dell'aria in ingresso è di 20 °C per la MV e 18 °C per DV. Per la DV l'aria non entra in condizioni isoterme poiché, come visto nel capitolo 2, immettere aria più fredda rispetto all'ambiente aiuta la diffusione di questa a livello del pavimento.

Uscita: come condizione al contorno in uscita si è scelto di usare la pressione. La condizione al contorno della pressione in uscita definisce una condizione di deflusso basata sulla pressione del flusso (P) in uscita. Tale condizione viene solitamente utilizzata in presenza di una portata (o velocità) o di una pressione più elevata assegnata all'ingresso. Come valore è stato impostato 0 Pa di pressione relativa all'uscita.

Muri interni: a questa tipologia appartengono tutte le superfici che danno verso l'interno dell'edificio, quindi le pareti interne, il pavimento e il soffitto. Viene assegnata una condizione al bordo di parete ovvero viene impostato il comportamento della velocità del flusso sulla faccia. Per definirla è stata considerata una condizione di *no-slip* che è consigliata per flussi viscosi e superfici reali con un gradiente di velocità dalla parete al flusso libero e la velocità alla parete pari a zero [40]. Per quanto riguarda lo scambio di calore si utilizza l'ipotesi di parete adiabatica, giustificata dal fatto che il nostro ambiente confina con ambienti alla stessa temperatura e quindi non c'è scambio di calore tra le pareti

e il nostro dominio.

Muro esterno: uguale ai muri interni ma questa volta al posto di essere adiabatico gli è stata assegnata una trasmittanza $U = 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Dato che le scuole sono utilizzate prevalentemente durante il periodo invernale, è stata scelta una temperatura minima di progetto $-8 \text{ }^\circ\text{C}$. In al caso il muro sarà considerato disperdente e il calore dalla stanza tenderà ad essere disperso verso l'esterno attraverso questa superficie.

Finestre: per le finestre sono state stesse considerazioni analoghe al muro esterno. Come trasmittanza è stata usata $U = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Non è stato considerato il carico esogeno della radiazione solare attraverso alla superficie vetrata per non complicare ulteriormente il modello.

Persone: per simulare il calore prodotto dalle persone all'interno della stanza si è scelto di utilizzare una condizione al bordo di parete alla quale è stata assegnata una potenza termica in W.

La potenza termica prodotta dalle persone all'interno di un locale dipende dal tipo di attività che sta svolgendo. I dati sono stati presi dal "Manuale d'ausilio alla progettazione termotecnica- AICARR" [41]. Un adulto seduto in attività leggera corrisponde 70 W di flusso termico sensibile. La normativa inoltre specifica che i carichi per una donna adulta e un bambino sono rispettivamente pari all'85% ed al 75% di quello di un uomo adulto. Considerando una classe composta in egual numero da alunni e alunne i carichi sensibili utilizzati sono riassunti in tabella 4.6

Carico sensibile [W · persona]	
Elementare	52,5
Media	52,5
Superiore	64,75

Tabella 4.6 Valori medi del flusso termico sensibile [W · persona] dovuti alla presenza di persone

Generazione di CO₂: all'interno del dominio in corrispondenza di ogni persona è stata implementata una sorgente di CO₂ in modo da simulare l'emissione dell'inquinante durante l'attività respiratoria delle persone.

La CO₂ emessa dipende dal tipo di attività (met) e dall'età dell'individuo. Come dati sono stati presi quelli pubblicati nello studio di A. Persily e L.de Jonge [42] in figura 4.8.

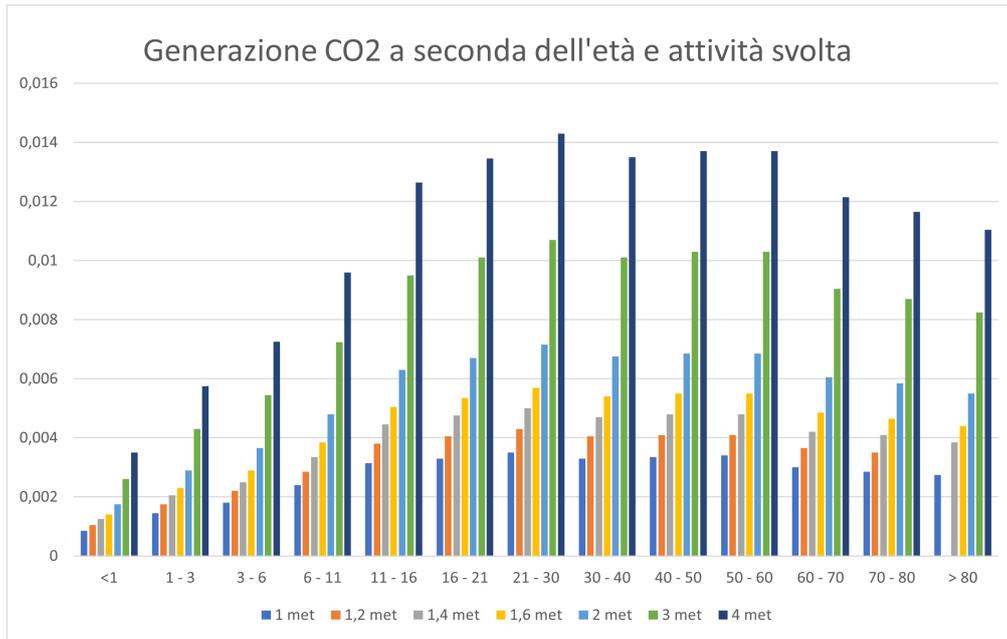


Figura 4.8 Tassi di generazione di CO₂ a 273 K e 101 kPa per intervalli di età e livello di attività fisica (in base alla massa corporea media di ciascun gruppo di età)

Considerando una classe composta in egual numero da alunni e alunne che svolgono un'attività pari a di 1,2 met, i tassi di generazione di CO₂ utilizzati nelle simulazioni sono riassunti in tabella 4.7:

Generazione di CO ₂ [L/s · persona]	
Elementare	0,00285
Media	0,0038
Superiore	0,00405

Tabella 4.7 Valori medi della generazione di CO₂ [L/s · persona] utilizzati nelle simulazioni

La CO₂ è stata modellata come *passive scalar* (scalare pasivo), ovvero come una quantità scalare che non partecipa attivamente alla fisica del flusso della simulazione CFD. Tale proprietà è garantita solo se la sorgente scalare passiva può essere considerata come un fluido con contaminanti/specie presenti in bassa concentrazione, che vengono trasportati all'interno del dominio e hanno così un effetto trascurabile sulle proprietà termofisiche del fluido. Un parametro importante per questo tipo di simulazioni è il *coefficiente di diffusione*. Il coefficiente di diffusione è una costante che descrive la velocità con cui una coppia di specie si diffondono l'una nell'altra. Più alta è la diffusività, più velocemente le specie si diffondono. Il coefficiente ha come unità di misura m²/s.

Nel caso di aria-CO₂ questo vale 0,0000164 m²/s [43].

PC: è stata usata la stessa condizione al bordo delle persone, il calore prodotto dal PC è stato ipotizzato uguale a 75 W.

Banchi: per questi è stata utilizzata una condizione al bordo di parete con comportamento termico adiabatico.

Capitolo 5

Risultati

5.1 Linee guida di applicabilità ventilazione meccanica

Il fine di questa sezione è generare una tabella con la concentrazione di CO₂ (in ppm) relativa calcolata tramite una simulazione stazionaria. Le simulazioni sono state eseguite sulle aule delle scuole elementari/medie/superiori per due diverse altezze e per due sistemi di ventilazione differenti: ventilazione a completa miscelazione (MV) e a dislocamento (DV). Le simulazioni sono in totale 12 e sono ricapitolate schematicamente alla tabella 5.1. Le portate d'aria per la ventilazione dell'aula sono quelle prescritte dal Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975 e già riassunte in tabella 4.5.

Tabella simulazioni stazionarie CFD

Sistema di ventilazione meccanica	Altezza dell'aula [m]	Tipo di scuola
Mixing Ventilation MV	2,7	Elementare
		Media
		Superiore
	3,5	Elementare
		Media
		Superiore
Displacement Ventilation DV	2,7	Elementare
		Media
		Superiore
	3,5	Elementare
		Media
		Superiore

Tabella 5.1 Simulazioni stazionarie per approccio prestazionale

La prima parte di questo lavoro di tesi è di tipo prescrittivo ovvero analizzare la normativa vigente in materia di ventilazione delle aule scolastiche e verificare se i livelli di CO₂ relativa, quindi le differenze di CO₂ tra interno ed esterno, sono accettabili.

Oltre a questo si sono anche verificate le condizioni di comfort, accennate al paragrafo 2.3, ovvero che la velocità dell'aria e le temperature siano tali da avere un PMV accettabile.

5.1.1 Altezza aula 2,7 m

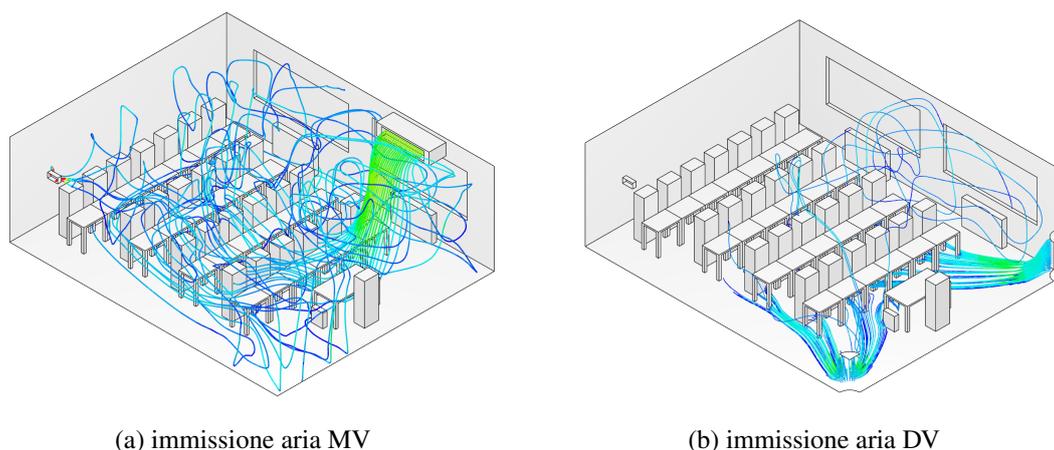


Figura 5.1 Modalità di immissione dell'aria per MV e DV

In figura 5.1 si vedono bene i due approcci di ventilazione.

In 5.1a è possibile notare come l'aria una volta immessa nell'aula si mescoli subito. Si nota quindi subito una criticità di queste unità decentralizzate MV. Il flusso tende a penetrare subito nella zona occupata in quanto l'ambiente sarà di qualche grado più caldo rispetto alla temperatura dell'aria in ingresso. Questo fenomeno potrebbe essere attenuato sfruttando l'effetto coanda, ovvero quel fenomeno fisico per il quale un getto di fluido tende a stare attaccato a una superficie. Tale effetto si verifica quando la bocchetta di immissione è molto ravvicinata a una parete (in questo caso potrebbe essere il soffitto della stanza). L'aria così immessa tramite questo fenomeno tende a non penetrare subito nella zona occupata evitando situazioni di discomfort e incrementando il mescolamento grazie al richiamo di aria dal basso.

Nella figura 5.1b al contrario l'aria, una volta immessa, si diffonde sul pavimento dell'aula come un manto sorpassando gli eventuali ostacoli (come banchi, persone). Una volta che l'aria raggiunge una velocità sufficientemente ridotta, inizia a salire verso il soffitto per effetto delle forze di galleggiamento date dai corpi scaldanti (persone, PC).

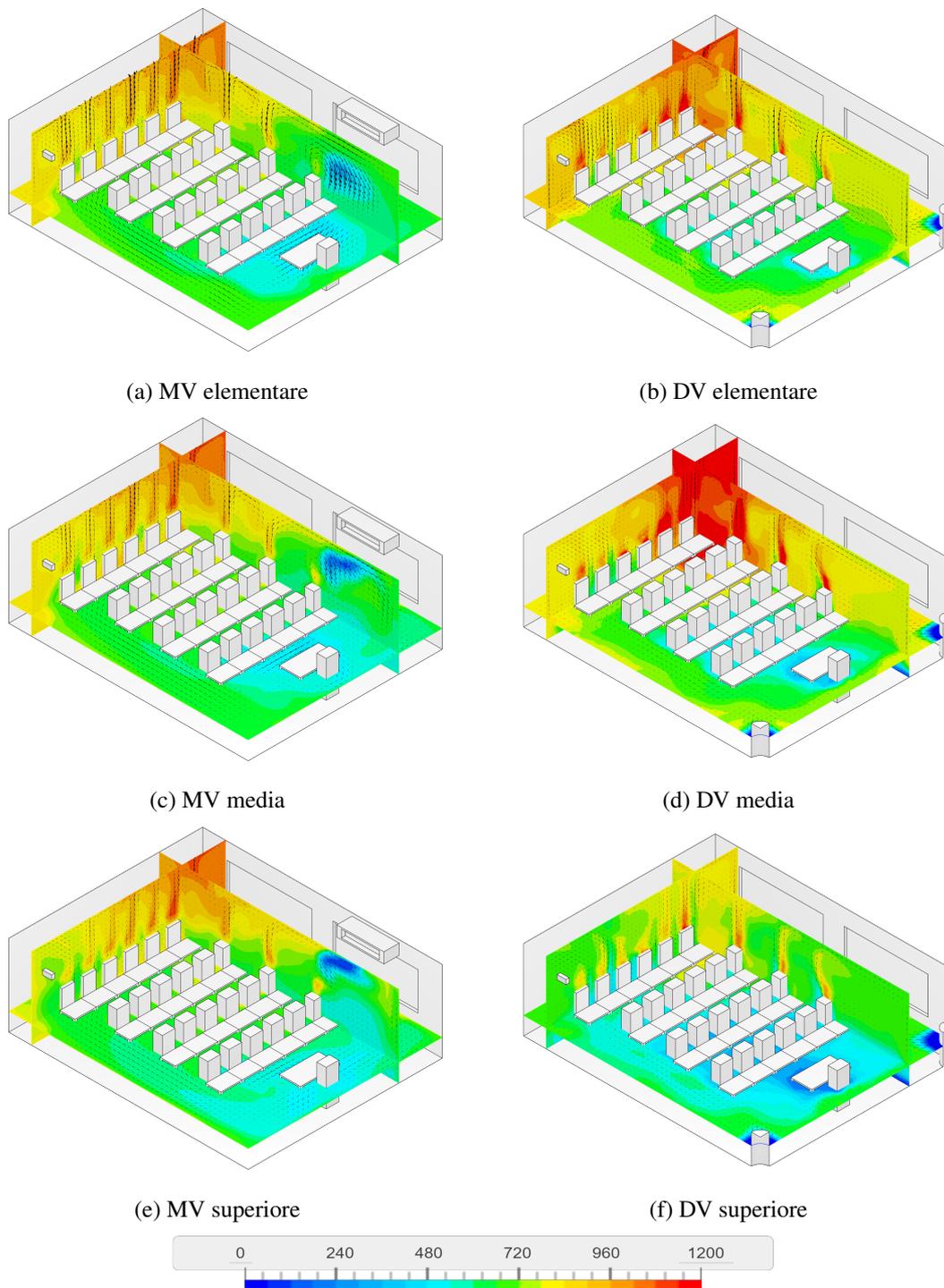
Andamento della differenza di concentrazione di CO₂ fra interno e l'esterno

Figura 5.2 CO₂ relativa [ppm] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 2,7m per MV e DV

Come concentrazione di CO₂ si intende solo quella generata all'interno dell'aula, che rimane per un tempo indefinito in condizioni stazionarie. Per calcolare la concentrazione di

CO₂ reale bisognerebbe sommare a questi valori quelli di CO₂ esterni. La concentrazione di CO₂ esterna minima è pressoché costante nel mondo, al momento circa 420 ppm (vedi figura 3.4), talvolta può essere superiore a questo valore (per esempio in ambienti urbani). Per rendere le analisi indipendenti da queste variabili pertanto si è deciso di concentrarsi solo sulla CO₂ generata all'interno in condizioni stazionarie. Ovviamente poi in fase progettuale tali valori dovranno essere corretti con l'aggiunta della CO₂ esterna all'aula. In figura 5.7 si è rappresentato il confronto di CO₂ tra MV e DV per i tre tipi di aula. In particolar modo emerge come nell'angolo dell'aula vicino alle finestre si crei un accumulo di CO₂ fino a circa 1200 ppm. In MV l'accumulo è minore rispetto a DV nelle scuole elementari e medie per poi peggiorare nelle scuole superiori.

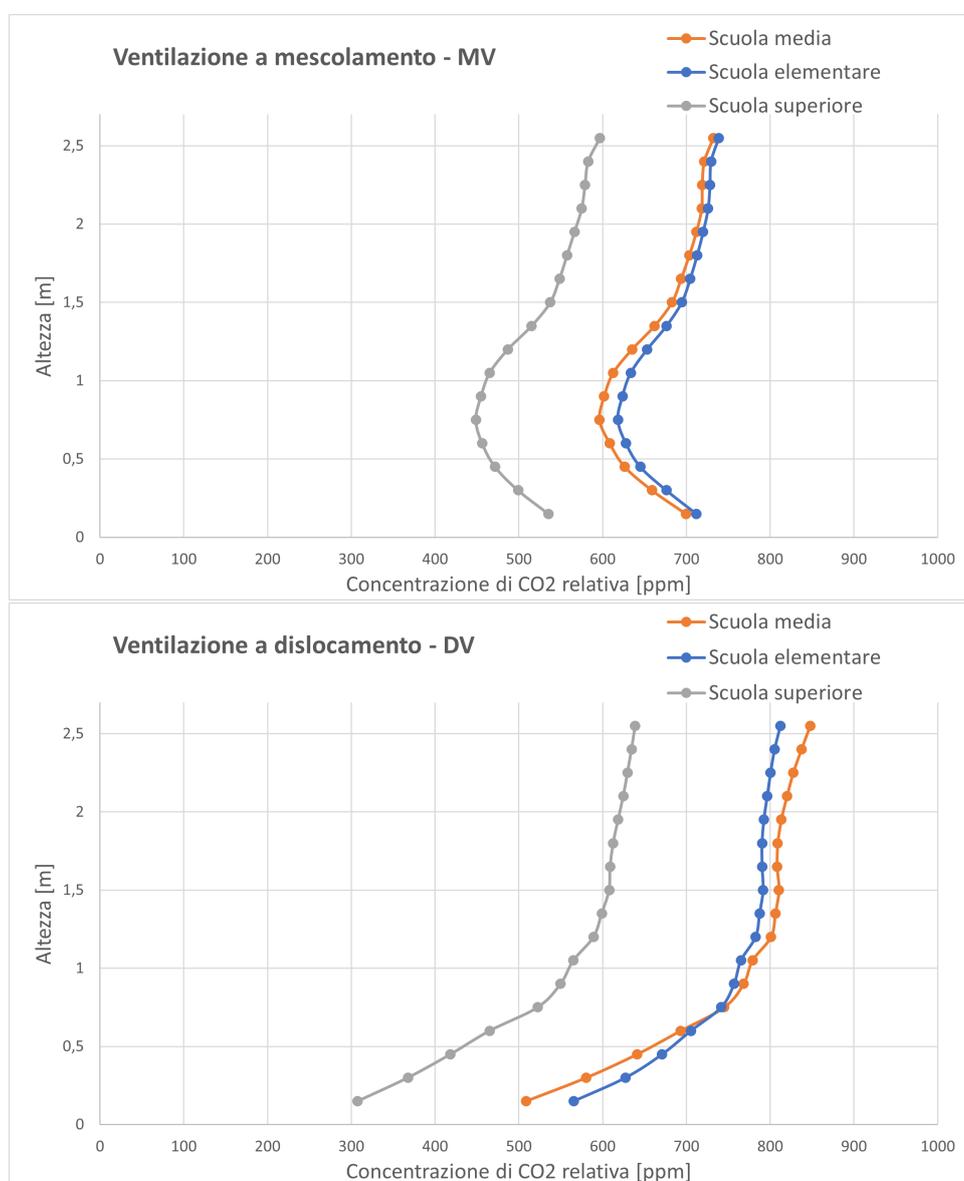


Figura 5.3 Profilo verticale della differenza di concentrazione di CO₂ [ppm] tra interno ed esterno in un'aula elementare/media/superiore di altezza 2,7m per MV e DV

In figura 5.3 sono rappresentati gli andamenti di concentrazione di CO₂ relativa in funzione dell'altezza dell'aula. Questi valori sono stati ottenuti tramite la media della concentrazione della CO₂ per 18 piani ognuno a una altezza differente rispetto al pavimento.

L'andamento della concentrazione in MV appare molto diverso da quello teorico. Infatti in una situazione di perfetta miscelazione in MV la CO₂ dovrebbe essere costante al variare dell'altezza, quindi sarebbe dovuto essere rappresentato da una retta verticale. Tale situazione non si verifica perché siamo ben lontani dalla condizione di mescolamento perfetto. L'aria di rinnovo infatti è immessa da un solo dispositivo che da solo non riesce a raggiungere tutte le parti dell'aula e quindi non riesce a creare un mescolamento perfetto. Inoltre nella parte bassa dell'aula, inizialmente la CO₂ relativa tende a diminuire fino ad un minimo che si registra all'altezza di 0,7 m. Si tratta di un'altra conferma del fatto che l'aria di rinnovo, una volta immessa, tende a cadere sui banchi delle prime file.

Per quanto riguarda la DV l'andamento della concentrazione di CO₂ relativa è molto simile a quella visti nella teoria. Infatti all'inizio è presente un forte gradiente di contaminante poiché la CO₂ ha una rapida variazione nella parte bassa, corrispondente all'altezza di immissione dell'aria, che si stabilizza successivamente a un'altezza denominata piano neutro.

Un'altra considerazione interessante è che gli andamenti di inquinante per la scuola elementare e media si assomigliano molto mentre nelle scuole superiori hanno concentrazioni di CO₂ inferiori di circa 150ppm. Questo scostamento è dovuto al fatto che la relazione tra l'indice fornito dal D.M. 1975 ovvero $5h^{-1}$ e il tasso di emissione di CO₂ per gli studenti di quella fascia di età è diverso rispetto alle scuole elementari e medie.

	MV			DV		
	elementare	media	superiore	elementare	media	superiore
CO ₂ uscita [ppm]	796,7	759,7	568	818,5	783	585
MAOF uscita ^a [s]	1401	1002	702	1397	1003	703
MAOF volume [s]	1242	931,3	687,4	1279	966,7	670,7

Tabella 5.2 Parametri registrati dalle simulazioni CFD per valutare l'efficienza di ventilazione nelle aule con altezza 2,7 m

^aMAOF: *Mean Age Of Fluid* ovvero età media dell'aria

Nella tabella 5.2 sono indicati alcuni parametri ricavati dalle simulazioni che servono per calcolare gli indici per la valutazione dell'efficienza di ventilazione. In teoria i parametri CO₂ uscita e MAOF uscita dovrebbero essere uguali per MV e DV caso per caso. Tali parametri sono infatti indipendenti dal metodo di ventilazione adottato e sono funzione dei

tassi di emissione degli inquinanti e delle portate di ventilazione. Se i valori dei parametri di CO₂ uscita e MAOF uscita dovessero essere troppo distanti potrebbero indicare una mancata convergenza delle simulazioni.

Nel caso dello studio in oggetto, gli scostamenti più grandi si riscontrano solo per la CO₂ in uscita ma rimangono comunque in un range accettabile sotto al 3%.

Il dato "MAOF volume" invece è un parametro fondamentale per il calcolo dell'efficienza di ventilazione ed è fortemente dipendente dalla modalità di ventilazione della stanza. Tramite le equazioni 2.8 e 2.10 vengono calcolati poi gli indici ACE e CRE visti nel capitolo 2.2.

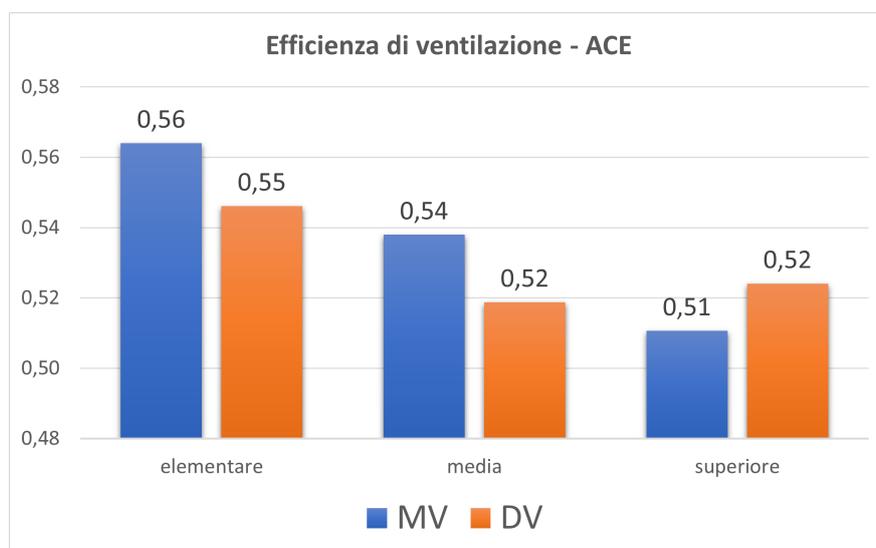


Figura 5.4 Efficienza di ventilazione ACE in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza di 2,7 m

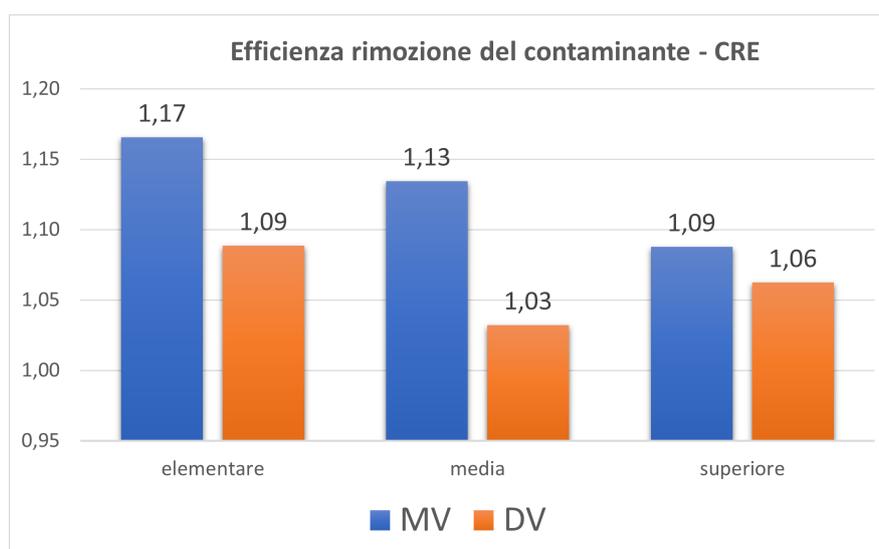


Figura 5.5 Efficienza di rimozione della CO₂ CRE in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza di 2,7 m

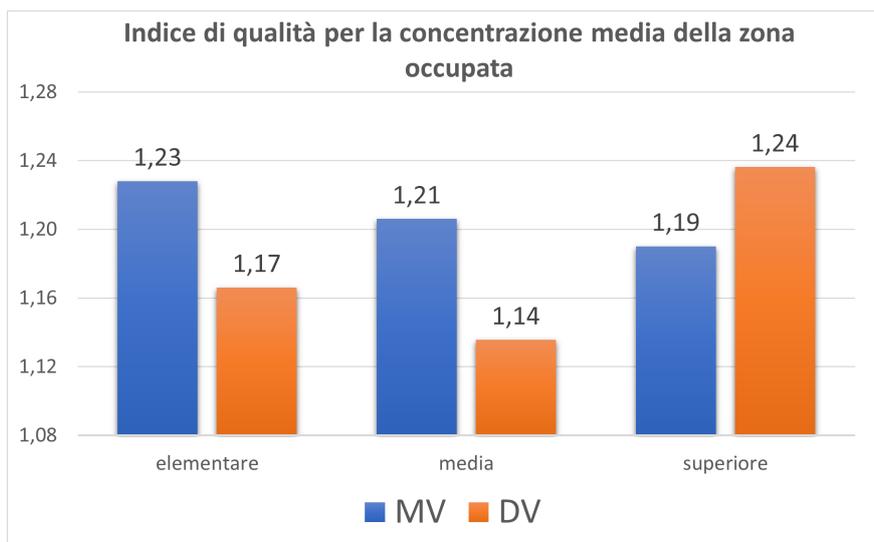


Figura 5.6 Efficienza di rimozione della CO₂ nella zona occupata (1,4 m) in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza di 2,7 m

Come si evince dalla figura 5.7 e poi confermato dai grafici 5.4, 5.5 e 5.6, per le aule elementari e medie la ventilazione MV tramite unità decentralizzata ha una maggiore efficienza e garantisce una rimozione dell'inquinante più alta rispetto alla ventilazione a dislocamento DV.

I vantaggi dati dalla ventilazione MV iniziano a scomparire nel momento in cui le portate aumentano ulteriormente, come è possibile vedere nel caso delle aule nelle scuole superiori. In questo caso, seppure la CRE sia maggiore in MV, la rimozione di inquinante nella zona occupata è maggiore in DV e ne giustifica quindi la sua applicazione. Teoricamente un sistema MV perfetto dovrebbe avere un ACE massimo di 0,5 e una CRE massima di 1. Tuttavia tale situazione non si verifica perché, come dimostrato prima, l'aria tende subito a scendere dal sistema decentralizzato e una volta che questa si trova a livello del pavimento fa sì che il sistema si comporti quasi come a dislocamento.

Le considerazioni di preferenza di un sistema rispetto all'altro illustrate fin'ora sono slegate dai termini di comfort interno, i quali verranno analizzati nei paragrafi successivi.

Andamento della temperatura

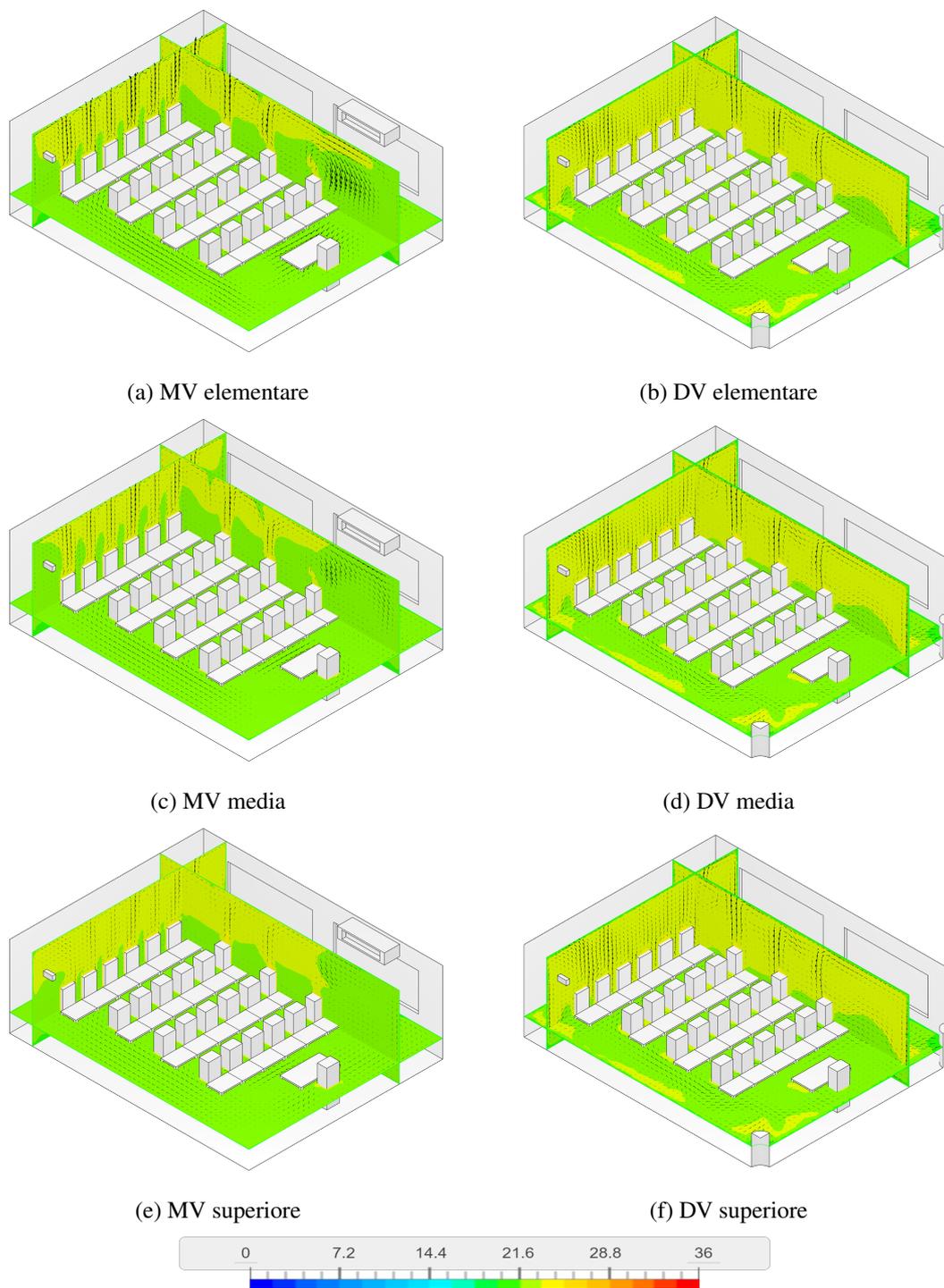


Figura 5.7 Temperatura [°C] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 2,7 m per MV e DV

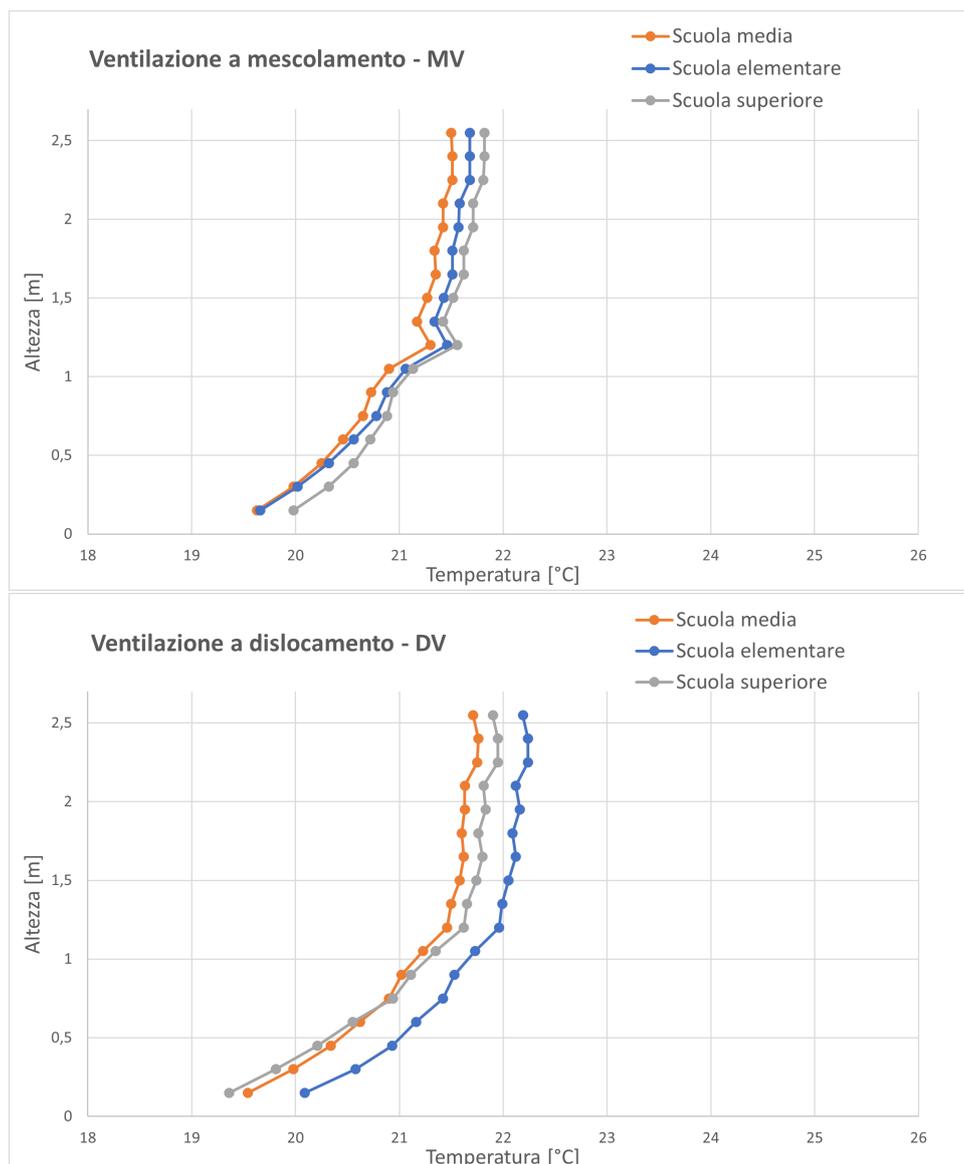


Figura 5.8 Profilo verticale della temperatura [°C] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 2,7 m per MV e DV

In figura 5.8 si vede molto bene come all'interno dell'aula si verifichi una stratificazione di temperatura sia per MV che per DV. Non si creano condizioni di discomfort in quanto la variazione di temperatura non supera i 2 °C/m . In MV non dovrebbe verificarsi una stratificazione di temperatura pertanto si evince che tale tipo di sistema decentralizzato MV non è in grado di garantire una corretta miscelazione all'interno dell'ambiente.

Nella tabella 5.3 è stato computato rapidamente un bilancio delle potenze termiche all'interno dell'aula. Oltre a questi contributi sarebbe da considerare anche il contributo di ventilazione dato dall'aria che entra a una temperatura più bassa di quella ambiente. Tale contributo è tanto maggiore quanto la portata di aria immessa aumenta e la temperatura di immissione diminuisce. Il calcolo di queste potenze è stato svolto supponendo che

l'unica superficie disperdente sia la parte esterna (quindi esclusi pavimento e solaio) e che all'esterno ci siano $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Inoltre non è stato considerato il contributo dovuto all'irraggiamento del sole attraverso le superfici trasparenti, il quale sarebbe da considerarsi come entrante nel sistema. Da questo semplice bilancio però è evidente come in una stanza con un isolamento buono ($U_{\text{parete}} = 0,3\text{ W/m}^2\text{K}$; $U_{\text{finestra}} = 1,2\text{ W/m}^2\text{K}$), nella quale sono presenti diverse persone, non è necessario utilizzare sistemi di riscaldamento (come ad esempio radiatori) in quanto le persone stesse contribuiscono al riscaldamento della stanza.

Al contrario l'analisi dimostra la non intuitiva necessità di raffrescare i locali anche in inverno.

	Potenza termica [W]	
	Entrante nel sistema	Uscente dal sistema
$Q_{\text{persone_E}}$	1365	-
$Q_{\text{persone_M}}$	1365	-
$Q_{\text{persone_S}}$	1683	-
Q_{PC}	75	-
Q_{parete}	-	75.6
Q_{finestre}	-	235.6

Tabella 5.3 Potenze termiche dovute alla presenza di persone, PC e dispersioni attraverso le superfici, E=elementari M=medie S=superiori

Andamento della velocità

In figura 5.9 sono rappresentati gli andamenti della velocità dell'aria all'interno dell'aula. Tramite questo filtro si possono facilmente vedere i pennacchi termici sopra le teste delle persone. Un'ulteriore conferma del fatto che un sistema decentralizzato MV come quello studiato non garantisce una perfetta miscelazione è data dalla presenza dei pennacchi sopra le teste delle persone, i quali non dovrebbero essere presenti in un sistema simile.

Si evince quindi subito che la distribuzione di velocità è più omogenea con la DV rispetto che MV. Il colore rosso rappresenta le velocità $\geq 0,2\text{ m/s}$ che possono creare discomfort per correnti d'aria. È evidente quindi il reale problema delle soluzioni decentralizzate MV le quali, dovendo processare grandi portate di aria di rinnovo, devono realizzare l'immissione ad alta velocità. In questo modello di aula gli studenti in prima fila potrebbero sentire correnti d'aria fastidiose.

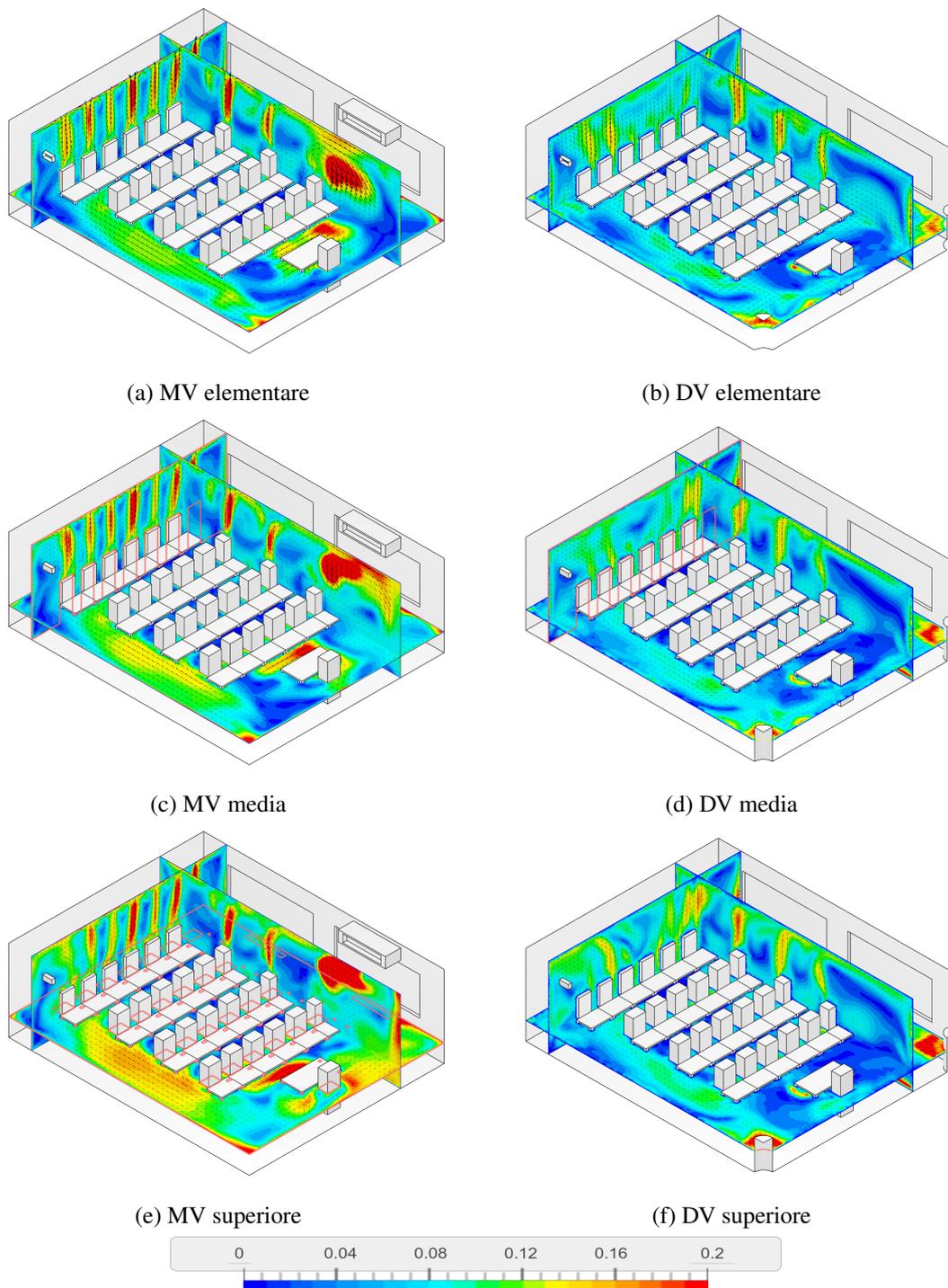


Figura 5.9 Velocità dell'aria [m/s] all'interno di un'aula elementare/media/superiore con un'altezza di 2,7 m per MV e DV

In figura 5.10 è mostrata una vista dall'alto della velocità nell'aula (in questo caso superiore) per un'altezza di 0,2 m dal pavimento, altezza per la quale la DV crea le maggiori velocità dell'aria. In questa immagine si evince che nessuno studente è investito da un flusso di aria superiore ai 0,2 m/s. Anzi è evidente che l'aria immessa si sparge andando ad inserirsi tra

tutte le file dei banchi.

Ovviamente aggiungendo ostacoli per terra, come ad esempio cartelle o zaini, il flusso d'aria viene ostacolato e la corretta ventilazione in tutta l'aula può non essere più garantita. La forte dipendenza dagli ostacoli a livello del pavimento costituisce difatti il principale problema della DV.

Osservando più attentamente la figura si riesce a notare come sia presente un'asimmetria tra il flusso di destra e quello di sinistra che, come si vedrà in seguito, è dovuto alla posizione delle bocchetta di ripresa.

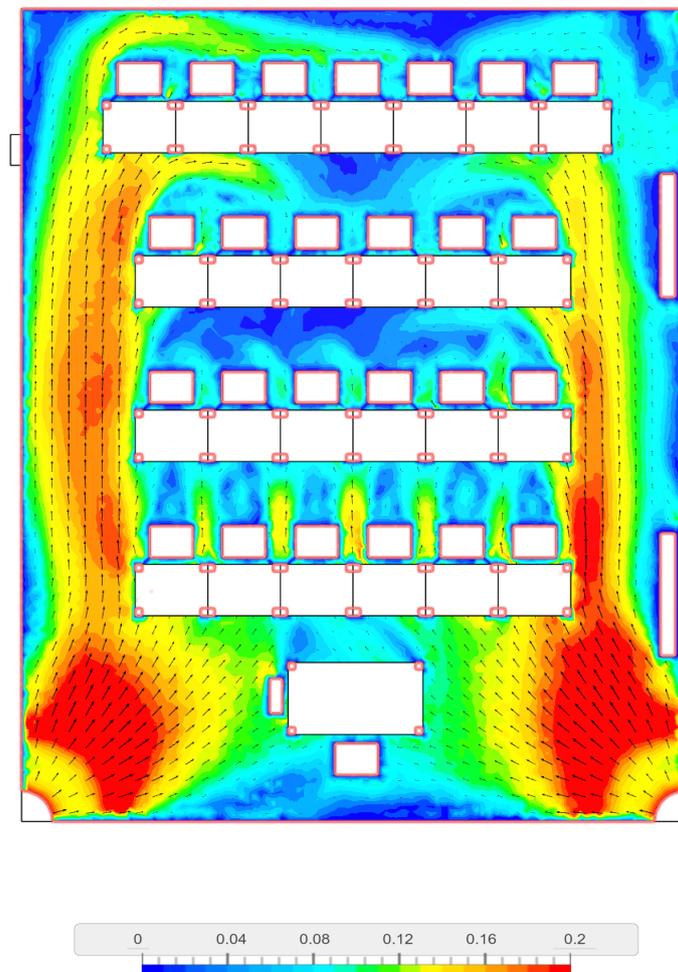


Figura 5.10 Vista dall'alto della velocità a 0,2 m dal pavimento con sistema DV in una scuola superiore con altezza di 2,7 m

5.1.2 Altezza aula 3,5 m

Per le aule con altezza 3,5 m sono state effettuate le stesse analisi della sezione precedente. L'unico parametro che cambia rispetto a prima è la portata di aria di rinnovo, la quale aumenta dato che l'altezza è passata da 2,7 m a 3,5 m, con conseguente aumento del volume. Come è possibile vedere in figura 5.11, la CO₂ relativa all'interno del locale è diminuita di molto rispetto alla situazione in figura 5.7. Come è logico aspettarsi, vi è una correlazione molto forte tra portata di ventilazione e CO₂.

Un'altra considerazione che si evince è che, in caso di MV, con l'aumento della portata, anche il mescolamento dell'aria cresce. Questo si può notare in figura 5.11 dove l'andamento della concentrazione di CO₂ appare molto più piatto rispetto a quello registrato in figura 5.7. In tabella 5.4 sono stati raccolti i parametri necessari alla determinazione degli indici di efficienza di ventilazione.

La CO₂ e la MAOF registrate sulla bocchetta di uscita sono molto simili tra MV e DV caso per caso il che indica una buona riuscita delle simulazioni CFD e della loro corretta convergenza.

Tramite questi dati si sono poi ricavati gli indici di efficienza riportati alle figure 5.13, 5.14 e 5.15. Gli indici della DV appaiono sempre maggiori rispetto a quelli della MV, a differenza del caso con l'aula con altezza di 2,7 m.

Tuttavia, i risultati più interessanti sono quelli alla figura 5.15 che dimostrano come il passaggio da una ventilazione a completa miscelazione a una a dislocamento comporti un netto miglioramento della qualità dell'aria nella zona occupata dalle persone. Il miglioramento è direttamente proporzionale all'aumento della portata di rinnovo, fino quasi ad arrivare al 50% per l'aula di una scuola superiore.

In figura 5.16 sono mostrate le temperature e in figura 5.17 l'andamento che questa assume al variare dell'altezza. Anche in questo caso vengono rispettate le condizioni di comfort in quanto non viene superata la condizione limite di variazione di temperatura di 2 °C/m sia per MV che DV.

Infine per quanto riguarda le velocità, in figura 5.18 sono mostrati gli andamenti all'interno delle varie aule. In MV, si possono notare un'elevato numero di zone con velocità dell'aria maggiore di 0,2 m/s. Gli alti valori di velocità risultano quindi ancora più discriminanti nella scelta della DV per questo tipo di aule.

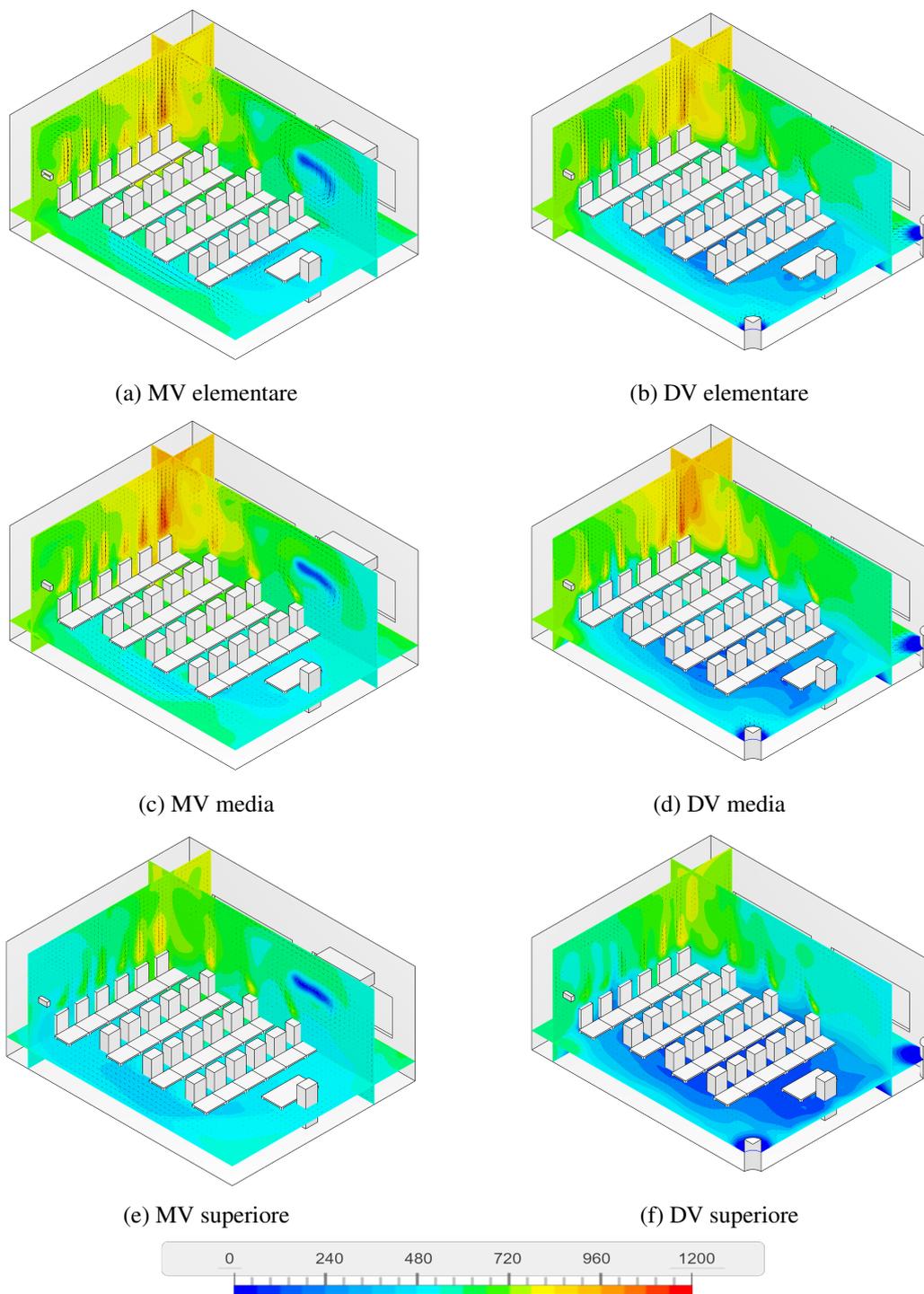
Andamento della differenza di concentrazione di CO₂ fra interno e l'esterno

Figura 5.11 CO₂ relativa [ppm] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 3,5 m per MV e DV

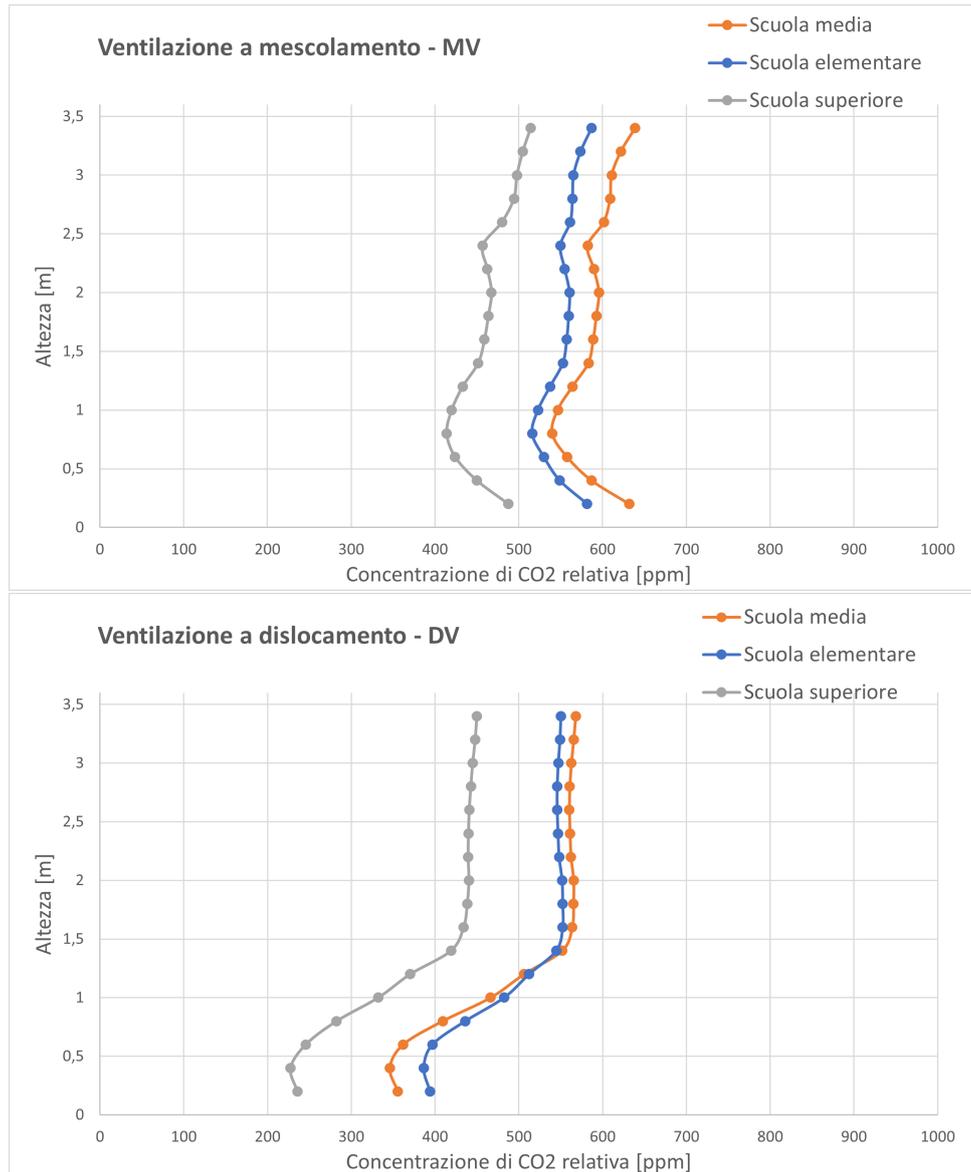


Figura 5.12 Profilo verticale della differenza di concentrazione di CO₂ [ppm] tra interno ed esterno in un'aula elementare/media/superiore di altezza 3,5m per MV e DV

	MV			DV		
	elementare	media	superiore	elementare	media	superiore
CO ₂ uscita [ppm]	619	590	439	619,5	591	441
MAOF uscita [s]	1418	1013	709	1411	1011	708
MAOF volume [s]	1341	1102	818,5	1263	945	673,1

Tabella 5.4 Parametri registrati dalle simulazioni CFD per valutare l'efficienza di ventilazione nelle aule con altezza 3,5 m

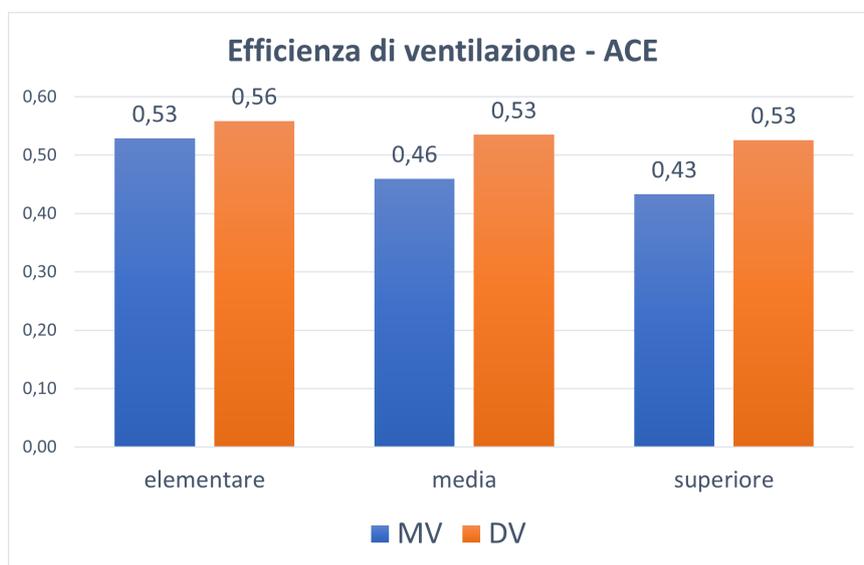


Figura 5.13 Efficienza di ventilazione ACE in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza 3,5 m

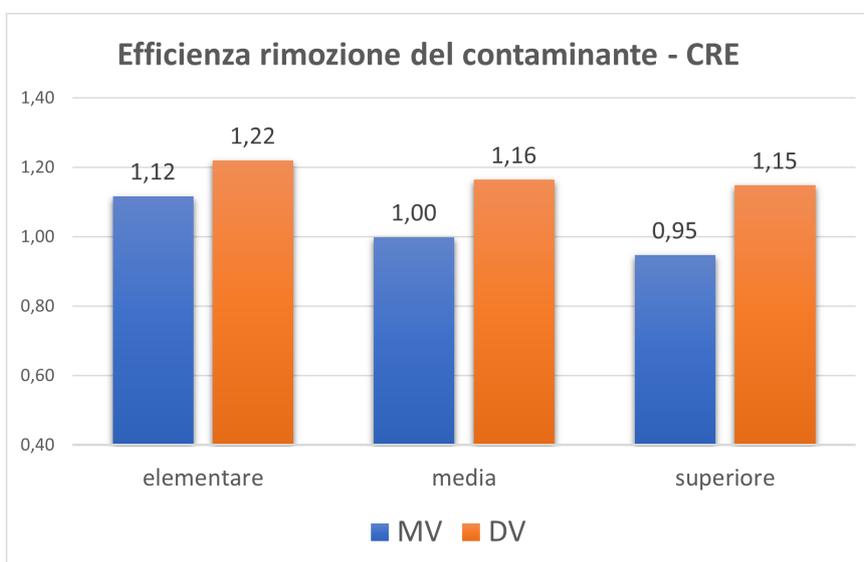


Figura 5.14 Efficienza di rimozione della CO₂ CRE in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza 3,5 m

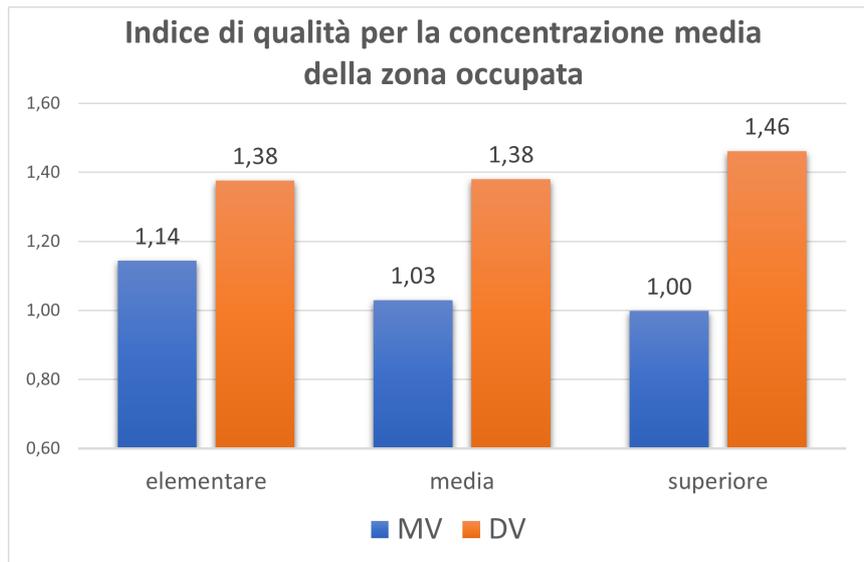


Figura 5.15 Efficienza di rimozione della CO₂ nella zona occupata (1.4 m) in MV e DV per elementari/medie/superiori in un'aula con altezza 3,5 m

Andamento della temperatura

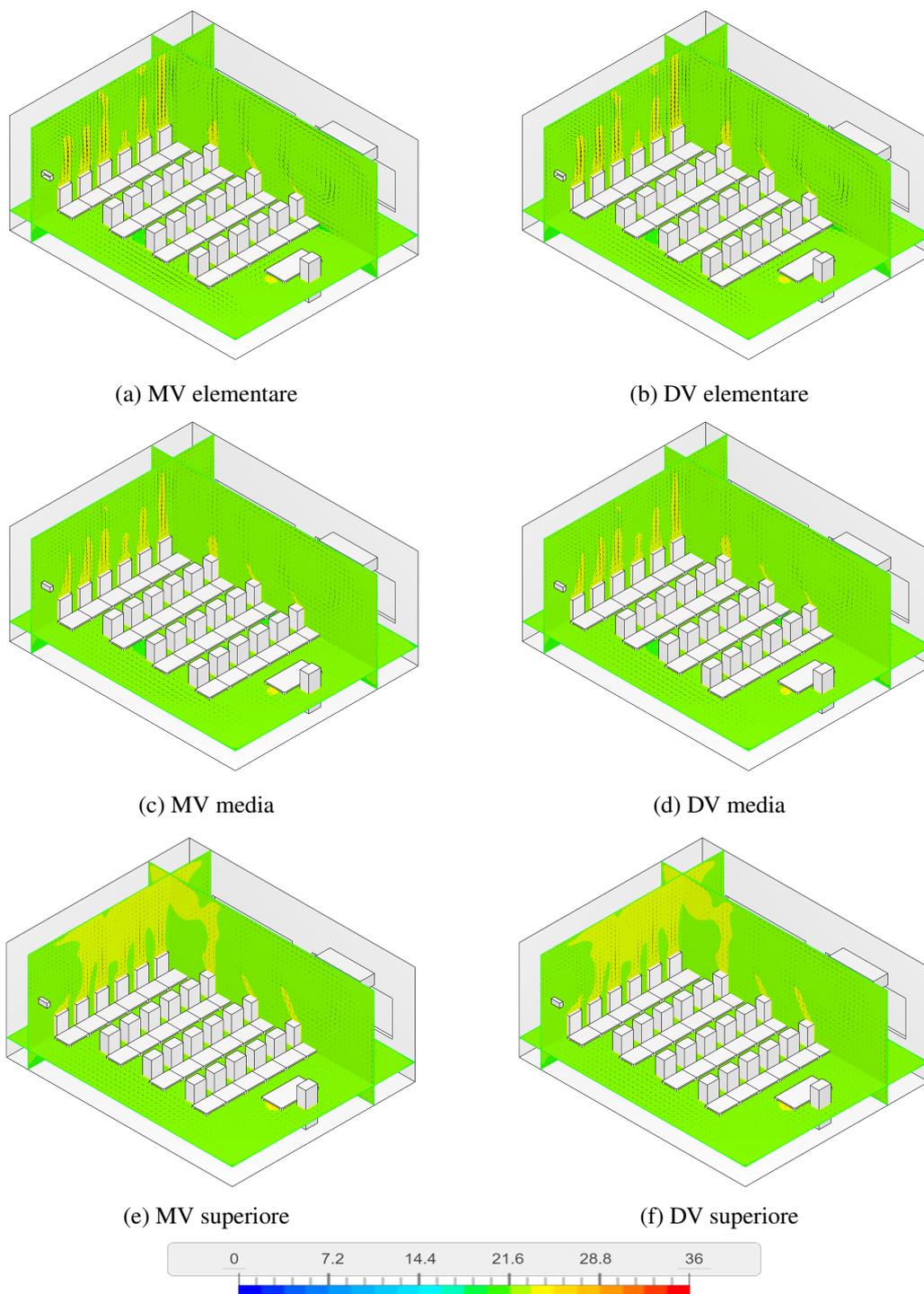


Figura 5.16 Temperatura [°C] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 3,5 m per MV e DV

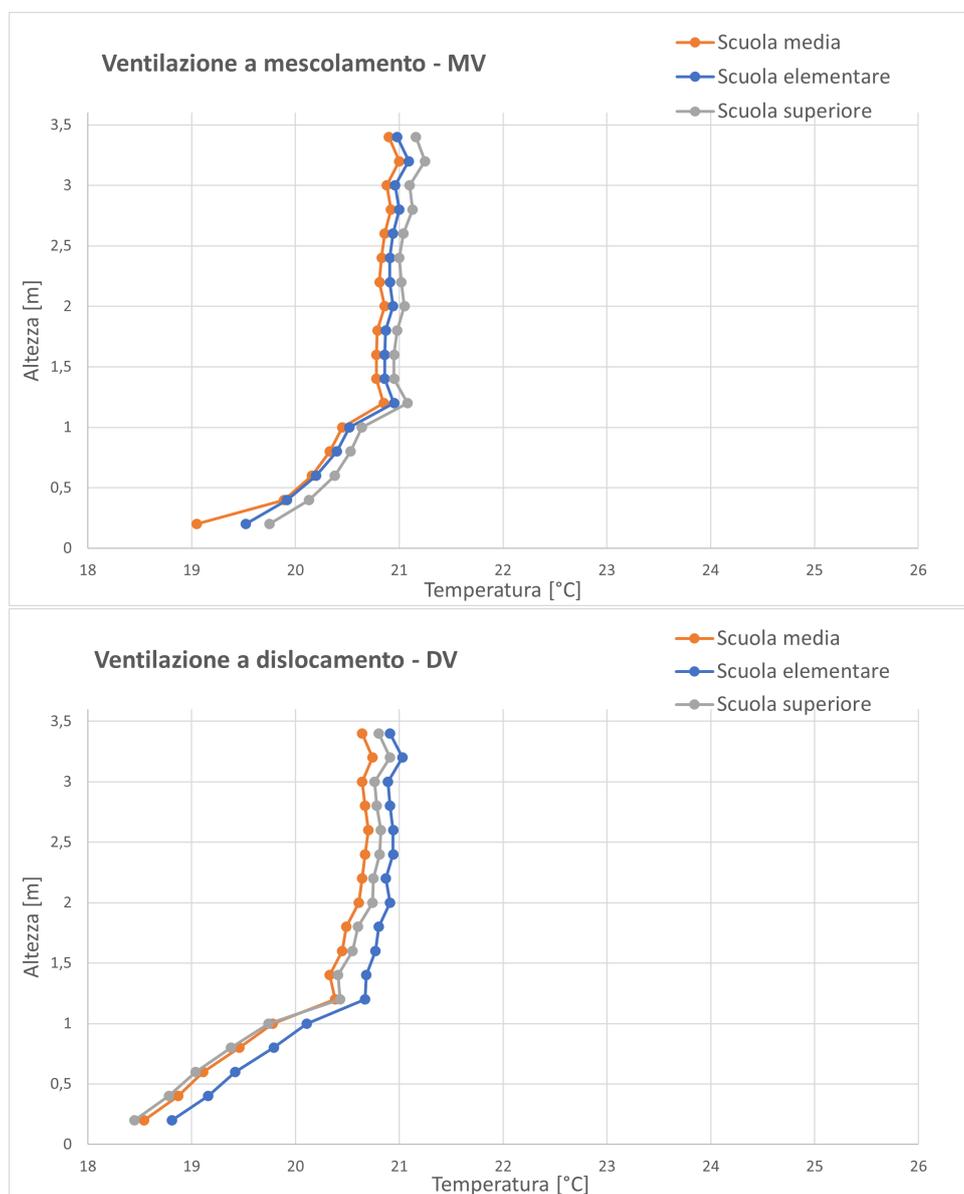


Figura 5.17 Profilo verticale della temperatura [°C] all'interno di un'aula elementare/media/superiore di altezza 3,5 m per MV e DV

Andamento della velocità

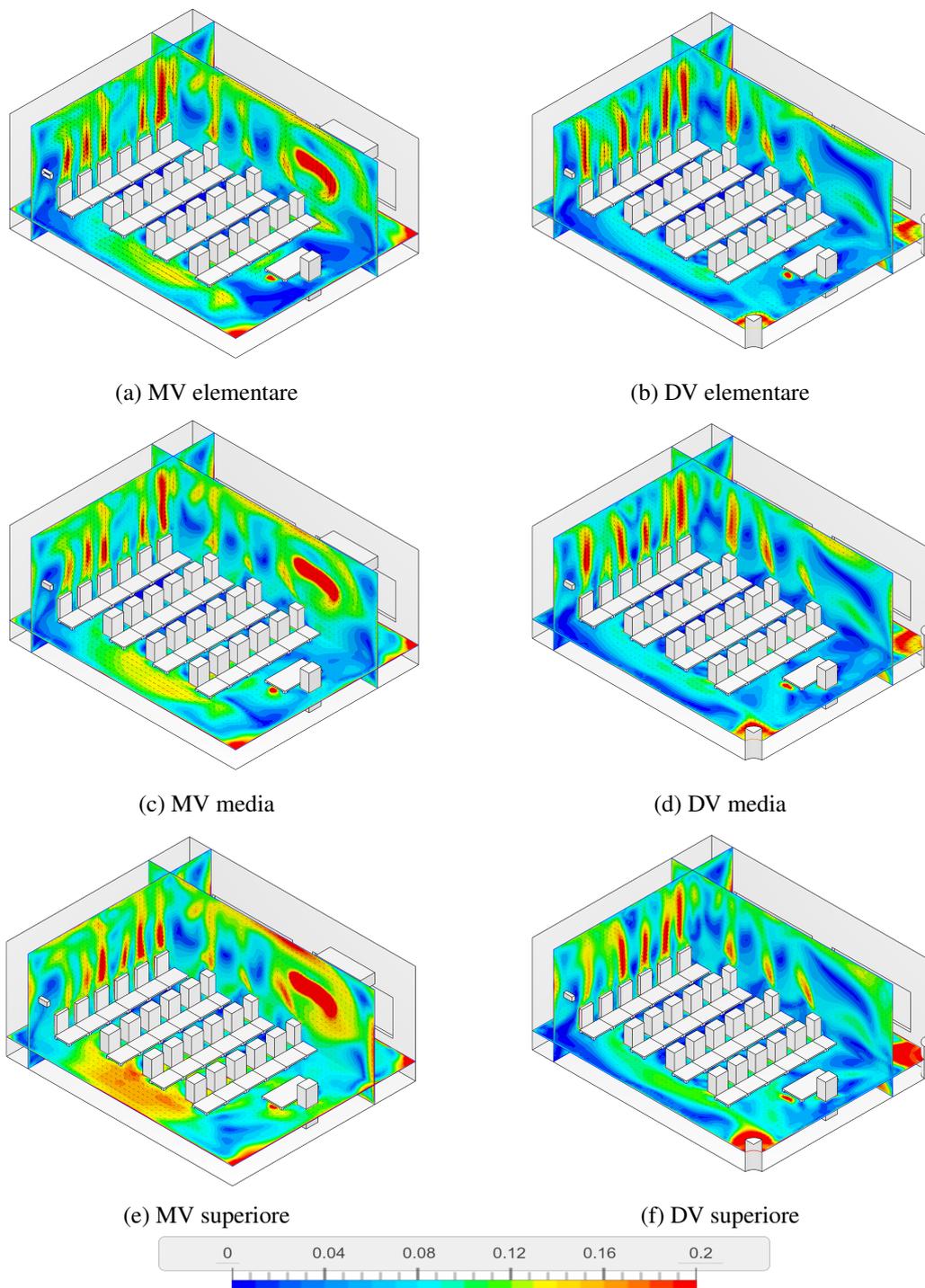


Figura 5.18 Velocità dell'aria [m/s] all'interno di un'aula elementare/media/superiore con un'altezza di 3,5 m per MV e DV

5.1.3 Risultati ottenuti

In tabella 5.5 vengono raccolti tutti i risultati ottenuti tramite simulazioni CFD di un aula tipo, le cui dimensioni sono elencate in tabella 4.1.

Con ε_{oz}^c viene definito l'indice di qualità per la concentrazione media di CO₂ nella zona occupata. Tramite la tabella 5.5, il progettista può decidere quale tecnologia di ventilazione meccanica sia più adatta a seconda della destinazione d'uso della classe (scuola elementare/media/superiore) e a seconda della altezza dell'aula. È interessante notare come aumentando sempre di più la portata di rinnovo, si ha una diminuzione dei parametri ACE, CRE e ε_{oz}^c per la MV, mentre al contrario per DV tendono a rimanere costanti se non ad aumentare.

In conclusione, salvo nel caso di l'aula elementare e media con altezza 2,7 m, si consiglia sempre di adottare un sistema di DV in quanto permette di raggiungere delle prestazioni in termini di IAQ migliori rispetto a MV.

Inoltre come visto dai grafici delle velocità, la DV, a differenza della MV, non rischia di creare correnti fastidiose dovute a velocità eccessive dell'aria.

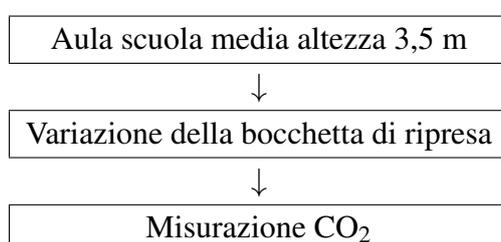
VENTILAZIONE MECCANICA NELLE AULE SCOLASTICHE SECONDO D.M. 1975									
Sistema di ventilazione meccanica	Altezza aula [m]	Destinazione uso classe	Portata [m ³ /h]	CO ₂ media stanza [ppm]	CO ₂ media zona occupata [ppm]	ACE [-]	CRE [-]	$\epsilon_{O_2}^c$ [-]	
Mixing Ventilation MV (con sistema decentralizzato)	2,7	Elementare	337,5	683	652	0,56	1,17	1,22	
		Media	472,5	670	633	0,54	1,13	1,20	
		Superiore	675	522	482	0,51	1,09	1,18	
Displacement Ventilation DV (tramite 2 dislocatori)	3,5	Elementare	437,5	554	541	0,53	1,12	1,14	
		Media	612,5	590	573	0,46	1,00	1,03	
		Superiore	875	464	440	0,43	0,95	1,00	
Displacement Ventilation DV (tramite 2 dislocatori)	2,7	Elementare	337,5	752	711	0,55	1,09	1,15	
		Media	472,5	759	702	0,52	1,03	1,11	
		Superiore	675	551	487	0,52	1,06	1,20	
Displacement Ventilation DV (tramite 2 dislocatori)	3,5	Elementare	437,5	508	450	0,56	1,22	1,38	
		Media	612,5	507	428	0,53	1,16	1,38	
		Superiore	875	384	302	0,53	1,15	1,46	

Tabella 5.5 Confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni stazionarie per lo stesso tipo di aula, per due altezze diverse con le portate fornite dal D.M. 1975

5.2 Variazione posizione della bocchetta di ripresa

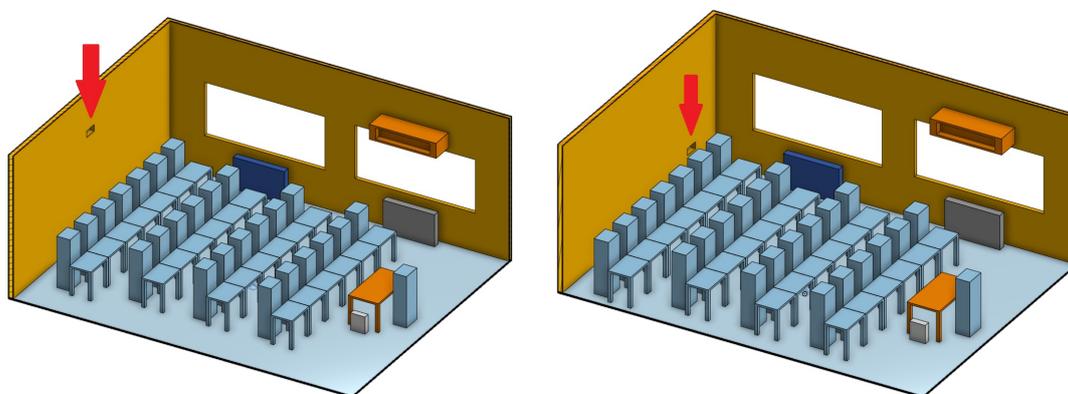
Nel paragrafo precedente abbiamo visto come in DV, il movimento dell'aria viene influenzato dalla posizione della bocchetta di ripresa nella stanza. In aggiunta i risultati ottenuti dimostrano anche che il sistema decentralizzato MV non garantisce una perfetta miscelazione dell'aria e quindi anche esso dipende dalla posizione della bocchetta di ripresa. Lo scopo di questa sezione è dimostrare come, a parità di portata di immissione e condizioni, si possa diminuire la CO₂ interna così da poter aumentare l'efficienza di ventilazione solamente spostando la bocchetta di ripresa.

La procedura che è stata eseguita è la seguente:



Come inizialmente stabilito nelle analisi precedenti, la posizione della bocchetta che è stata scelta è quella più comune e facile da realizzare. Oltre a questa, si propongono altre due posizioni elencate di seguito alla figura 5.19. L'analisi prende in considerazione così 3 posizioni:

- Posizione 1= bocchetta di ripresa sul muro del corridoio (soluzione classica)
- Posizione 2= bocchetta di ripresa posta sul muro in alto (figura 5.19(a))
- Posizione 3= bocchetta di ripresa posta sul muro in basso (figura 5.19(b))



(a) Bocchetta di ripresa in alto (POSIZIONE 2)

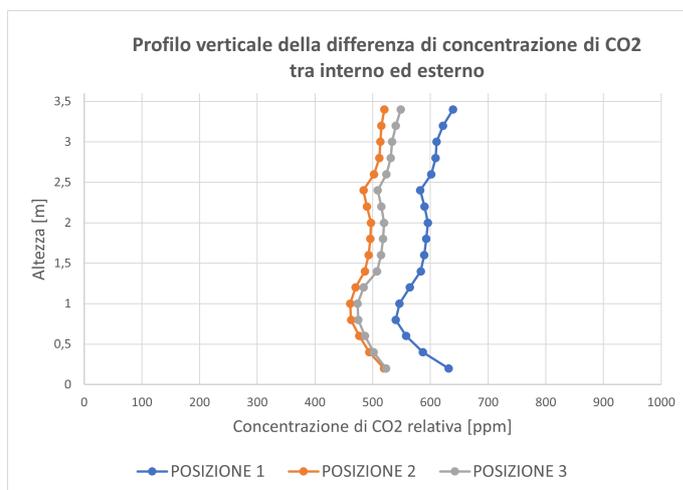
(b) Bocchetta di ripresa in basso (POSIZIONE 3)

Figura 5.19 Variazione della posizione della bocchetta di ripresa

La scelta della POSIZIONE 2 e POSIZIONE 3 è stata guidata dal fatto che nella sezione precedente si era visto come in quell'angolo dell'aula si accumulava la CO₂ e il ricambio dell'aria non era ottimale.

Le bocchette in queste due posizioni sono più difficili da inserire in un edificio, soprattutto se in ristrutturazione, ciononostante i risultati ottenuti sono interessanti al punto che il progettista debba considerare anche tali opzioni.

5.2.1 Variazione posizione ripresa in MV



	ACE	CRE	epsilon
POSIZIONE 1	0,46	1	1,03
POSIZIONE 2	0,53	1,21	1,24
POSIZIONE 3	0,54	1,09	1,14

Tabella 5.6 Indici efficienza ventilazione a seconda della posizione della bocchetta in MV

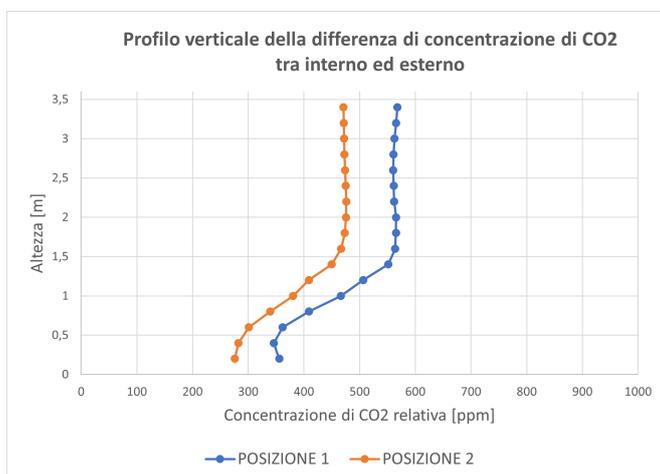
In figura si nota come rispetto alla POSIZIONE 1 (standard) si riesce ad ottenere un miglioramento fino a 100 ppm solo cambiando la posizione della ripresa. Sebbene la POSIZIONE 2 e POSIZIONE 3 quasi si equivalgono sulla CO₂ relativa media rispetto all'altezza, guardando la tabella 5.6 si vede come la POSIZIONE 2 garantisca una qualità dell'aria molto migliore rispetto alle altre due posizioni.

Da tali considerazioni ne deriva che questi sistemi di ventilazione meccanica decentrizzati siano fortemente dipendenti dal punto in cui si vuole far uscire l'aria viziata. Il posizionamento della ripresa dell'aria risulta così estremamente importante e non dovrebbe essere guidato solo da questioni di comodità impiantistiche ma avvenire in base all'IAQ migliore garantita all'interno dell'aula. Soprattutto perché a parità di IAQ, tramite un posizionamento della ripresa ben studiato, è possibile diminuire le portate di rinnovo e quindi i costi di funzionamento dell'impianto di ventilazione.

Si sottolinea anche che la bocchetta nella POSIZIONE 3, essendo molto vicina agli studenti, potrebbe generare un'emissione sonora fastidiosa dovuta all'alta velocità dell'aria in ripresa. Questo problema si potrebbe risolvere aumentando l'aria di passaggio dell'aria e quindi allargando la bocchetta di ripresa.

5.2.2 Variazione posizione ripresa in DV

È stato eseguito lo stesso procedimento con DV. In questo caso però la POSIZIONE 3 viene esclusa in quanto i sistemi a ventilazione a dislocamento, per funzionare correttamente ed evitare cortocircuito, devono avere la bocchetta di ripresa nella parte alta della stanza.



	ACE	CRE	epsilon
POSIZIONE 1	0,53	1,16	1,38
POSIZIONE 2	0,60	1,42	1,72

Tabella 5.7 Indici efficienza ventilazione a seconda della posizione della bocchetta in DV

Dai risultati si scopre che l'efficienza di questi sistemi di ventilazione è fortemente dipendente da dove viene fatta la ripresa dell'aria. Si nota il grande aumento dei parametri in tabella 5.7 nel passare dalla posizione standard alla POSIZIONE 2.

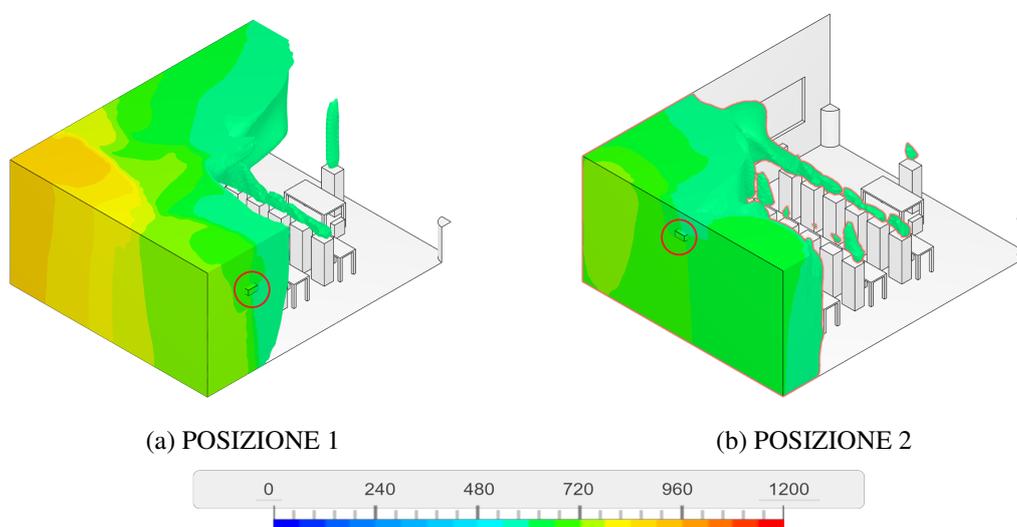


Figura 5.20 Confronto punti di ristagno (CO_2 relativa ≥ 500 [ppm]) all'interno di un'aula (scuola media) altezza 3,5 m con DV al variare della posizione della ripresa dell'aria

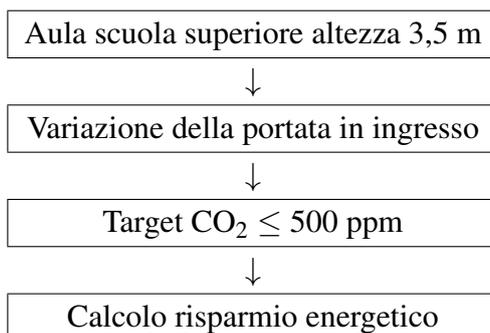
In figura 5.20 viene mostrata come cambia la situazione passando dalla POSIZIONE 1 alla POSIZIONE 2 della bocchetta di ripresa (cerchiate in rosso). Tramite il filtro impostato durante la fase di post-process si vedono i punti di ristagno della CO_2 , ovvero quei punti dove la concentrazione della CO_2 relativa all'interno dell'aula è ≥ 500 [ppm].

5.3 Analisi critica dei parametri di legge

Nelle sezioni precedenti si è visto come in certi casi i valori di ventilazione forniti dal decreto D.M. 1975 portino ad avere un'ottimale IAQ con dei valori di CO₂ relativa molto bassi. Il lavoro svolto in questa sezione è stato di tipo prestazionale, si fa riferimento ad un caso dove l'applicazione del decreto porta ad avere prestazioni interne ottime e si va quindi a ridurre la portata di ventilazione in ingresso fino a raggiungere le condizioni limite di CO₂ relativa interna.

L'aula scelta per queste analisi di seguito è quella alta 3,5m per una scuola superiore. In questo caso si utilizzano le considerazioni elaborate nella sezione precedente, quindi la bocchetta di estrazione dell'aria è in POSIZIONE 2 poiché permette di raggiungere una IAQ migliore.

Al termine del capitolo, si calcolerà quindi il risparmio, in termini energetici, dovuto al decremento di portata che il sistema di VMC deve elaborare. La procedura di analisi viene quindi riassunta di seguito:



Il primo passaggio consiste nell'effettuare diverse simulazioni fluidodinamiche diminuendo ogni volta la portata e registrando i risultati ottenuti. Tramite l'interpolazione dei dati, si intende infatti creare la curva che lega la CO₂ relativa interna alla portata di rinnovo.

	Variazione portata di ventilazione, aula scuola superiore con MV					
	MV 100%	MV 95%	MV 90%	MV 80%	MV 70%	MV 60%
Portata q [m ³ /h] (h ⁻¹)	875 (5)	831,3 (4,75)	787,5 (4,5)	700 (4)	612,5 (3,5)	525 (3)
CO ₂ media [ppm]	367	374	404	450	504	584
CO ₂ media 1,4 m [ppm]	351	360	390	435	487	560
ACE [-]	0,53	0,54	0,53	0,54	0,55	0,53
CRE [-]	1,22	1,26	1,23	1,24	1,27	1,18
ϵ_{oz}^c [-]	1,27	1,32	1,29	1,31	1,33	1,24

Tabella 5.8 Risultati ottenuti dalla variazione della portata di ventilazione all'interno di un'aula alta 3,5 m con MV ad uso di una scuola superiore con bocchetta di ripresa in POSIZIONE 2

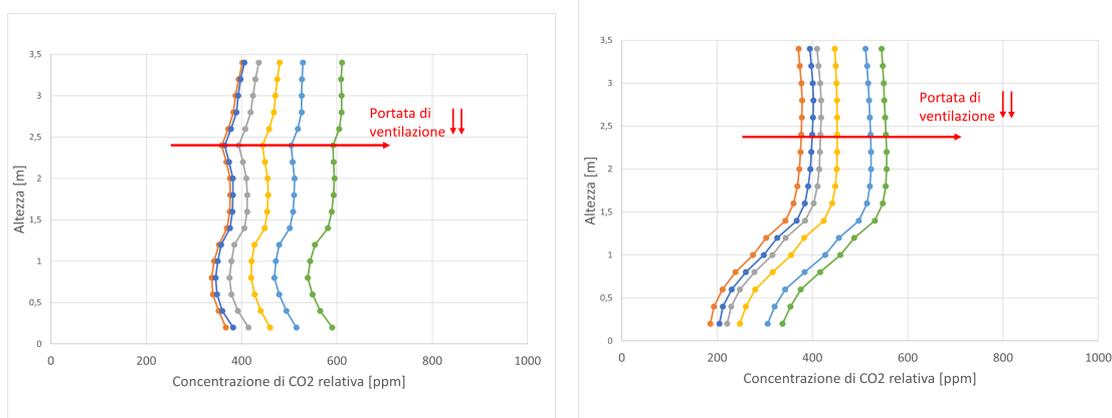
Variazione portata di ventilazione, aula scuola superiore con DV

	DV 100%	DV 95%	DV 90%	DV 80%	DV 70%	DV 60%
Portata q [m ³ /h] (h ⁻¹)	875 (5)	831,3 (4,75)	787,5 (4,5)	700 (4)	612,5 (3,5)	525 (3)
CO ₂ media [ppm]	323	345	362	398	466	499
CO ₂ media 1,4 m [ppm]	250	271	289	324	391	423
ACE [-]	0,58	0,58	0,58	0,60	0,59	0,60
CRE [-]	1,39	1,37	1,37	1,41	1,37	1,38
$\epsilon_{O_2}^c$ [-]	1,79	1,74	1,72	1,73	1,64	1,62

Tabella 5.9 Risultati ottenuti dalla variazione della portata di ventilazione all'interno di un'aula alta 3,5 m con DV ad uso di una scuola superiore con bocchetta di ripresa in POSIZIONE 2

In tabella 5.8 e 5.9 è possibile osservare i risultati ottenuti da 6 diverse simulazioni con portate differenti sia per MV che per DV. Come ci si aspettava, al diminuire della portata, la CO₂ relativa tende a salire mentre i parametri ACE e CRE sono circa costanti. Per quanto riguarda la MV, $\epsilon_{O_2}^c$ tende a rimanere costante mentre per DV si registra una sua progressiva diminuzione.

Il profilo della concentrazione di CO₂ relativa per il caso MV (a sinistra) e DV (a destra) sono mostrati in figura 5.21 .



(a) Ventilazione a completa miscelazione - MV

(b) Ventilazione a dislocamento - DV

Figura 5.21 Profili verticali CO₂ relativa all'interno di un'aula (scuola superiore) al variare della portata di ventilazione con ventilazione a completa miscelazione MV e dislocamento DV

Da questi risultati è stato poi possibile creare la curva in figura 5.22 che lega la portata di ventilazione alla differenza di CO₂ relativa tra interno ed esterno. La curva blu rappresenta l'interpolazione tra la CO₂ media relativa nella stanza e la portata di ventilazione per il caso DV, mentre la curva arancione è l'interpolazione tra la CO₂ media relativa nella stanza e la portata di ventilazione per MV.

Come unità di misura per la portata di aria di rinnovo si sceglie l/s·persona. In questa forma

è possibile fare una stima immediata sulla portata richiesta dai singoli locali a seconda dell'occupazione. Oltre a questo, è facile integrarla in una logica di controllo la quale a seconda dell'affollamento, va a diminuire o incrementare la portata d'aria.

Il valore ottenuto è la CO₂ relativa rimanente all'interno dell'aula in condizioni stazionarie ed è dovuta alla presenza delle persone. Nella realtà l'aria che si usa per la ventilazione è presa dall'esterno e ha una concentrazione di CO₂ che attualmente è pari a 420 ppm (vedi figura 3.4) con possibili aumenti nelle aree densamente popolate come gli ambienti urbani. La concentrazione di CO₂ totale sarà la somma di quella generata all'interno più quella esterna. Pertanto, se nell'aula si vuole rimanere sotto un valore di 1000 ppm circa (consigliato da diverse norme europee, vedi 3.6) allora, considerando l'ipotesi peggiorativa di 500 ppm esterni, la concentrazione di CO₂ generata dalle persone va mantenuta sotto i 500 ppm.

Dai risultati in 5.22 si nota come la curva della DV si mantenga sempre sotto a quella della MV per questo range di portate. Da tale considerazione si evince che per mantenere una determinata concentrazione di CO₂ relativa all'interno dell'ambiente, la DV richieda una minor quantità di aria di rinnovo rispetto alla MV che si traduce in un risparmio energetico.

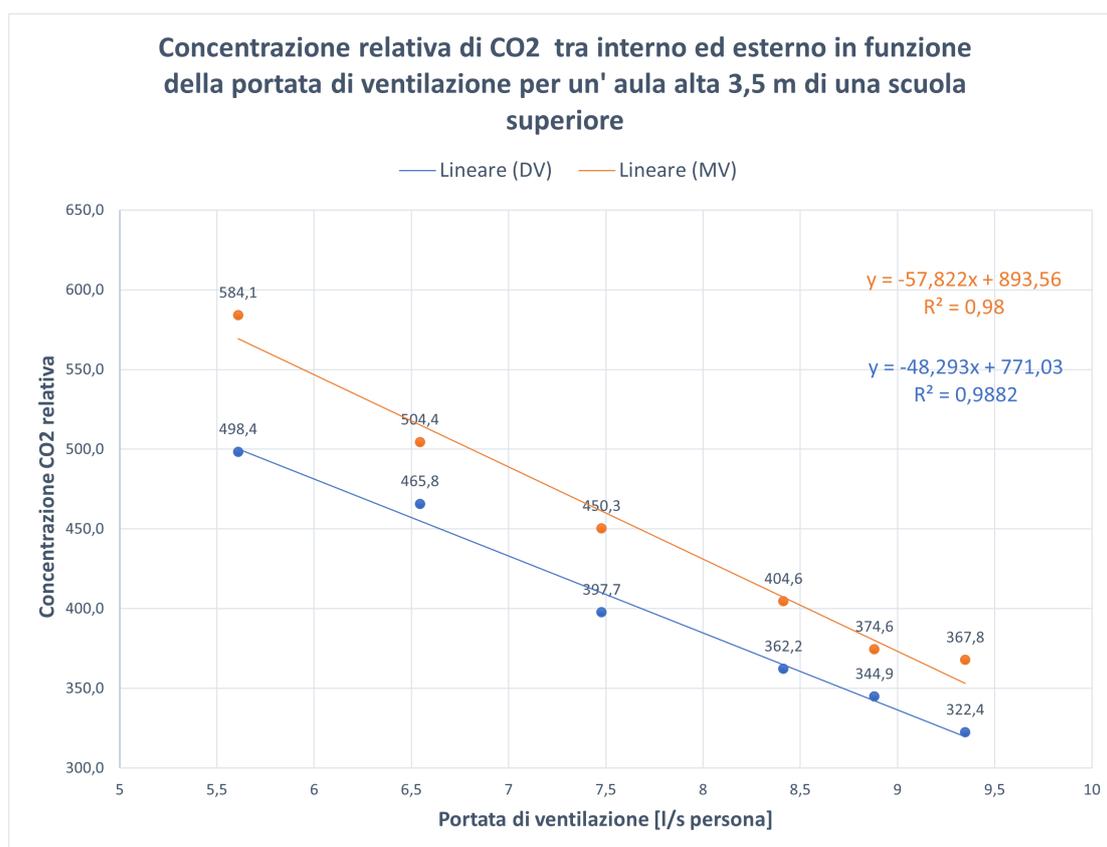


Figura 5.22 Variazione della CO₂ relativa in funzione della portata di ventilazione per una aula alta 3,5m di una scuola superiore con DV e bocchetta di ripresa in POSIZIONE 2

Si nota che, in questo caso studio, per ottenere una concentrazione di CO₂ relativa di 500 ppm tra interno ed esterno, per DV è sufficiente una portata di ventilazione di 5,6 l/s-persona (che corrisponde al 60% di quella imposta dal D.M. 1975) mentre per MV sono necessari circa 6,6 l/s-persona (poco più del 70% della portata del D.M. 1975).

Nella prossima sezione si procede al calcolo di una stima del risparmio energetico che si otterrebbe da tale diminuzione di portata di ventilazione.

5.3.1 Calcoli di risparmio energetico lungo tutto il periodo invernale

L'analisi energetica di questa sezione ha come obiettivo il calcolo di una stima energetica necessaria per il funzionamento dell'impianto VMC nonché la valutazione del risparmio ottenuto dalla diminuzione della portata di ventilazione rispetto a quella normata dal D.M. 1975.

Le simulazioni fluidodinamiche sono state fatte tutte considerando il periodo invernale e una temperatura esterna è di -8 °C (Torino). Per questo tipo di analisi invece sono state usate le temperature reali registrate nell'anno 2022 in quanto, per un calcolo energetico, una temperatura fissa di quel tipo avrebbe portato a una sovrastima eccessiva dell'energia utilizzata.

Dal sito "banca dati meteorologica - ARPA Piemonte" [44] sono state prese le temperature registrate ogni ora di tutto il 2021-2022. Da questo dataset sono poi presi solo i giorni all'interno del periodo che va dal 15 ottobre 2021 al 15 aprile 2022, ovvero quelli in cui è in funzione il riscaldamento (nella zona climatica di Torino) togliendo anche i giorni festivi come le domeniche, le vacanze di Natale e Pasqua. Nei giorni rimanenti infine sono state considerate solo le ore scolastiche ovvero quelle comprese tra le 8:00 e le 13:00.

Di seguito si elencano le ipotesi fatte:

- **Giorni di funzionamento** : i giorni del periodo invernale di funzionamento dell'impianto sono 133 che corrispondono a 665 ore di funzionamento totali.
- **Temperatura interna** : la temperatura interna di progetto nel periodo invernale è 20°C.
- **Portata costante**: viene presa in considerazione una portata costante che corrisponde alla capienza piena dell'aula (26 persone) ovvero nel caso DV 100% 875 m³/h (9,4 l/s-persona) e nel caso DV 60% 525 m³/h (5,6 l/s-persona).

Tale ipotesi porta ad una sovrastima del consumo elettrico totale in quanto in una situazione reale, l'aula non sarà mai occupata tutte le 5 ore per tutta la settimana dalle stesse persone in maniera continuativa, questo a causa di assenze o spostamento della lezione in vari laboratori.

- **Impianto con recupero di calore:** è stato inserito uno scambiatore per recuperare parte del calore che ha l'aria in uscita (che altrimenti andrebbe perso) con un'efficienza di $\varepsilon_R = 0,8$.
- **Rendimento ventilatore:** Il funzionamento dell'impianto è comandato da un ventilatore con efficienza $\varepsilon_V = 0,7$.
- **Perdite di pressione impianto:** Le perdite di pressioni totali all'interno dell'impianto sono stimate a circa 350 Pa (la maggior parte di queste sono date dal recuperatore di calore).
- **Pompa di calore:** l'energia termica che si fornisce per coprire il carico termico di ventilazione viene fornita attraverso una pompa di calore con COP ("*Coefficient of Performance*") pari a 2,5.

Per la seguente analisi si eseguiranno i passaggi e elencheranno i risultati intermedi solo per il caso DV, infine verrà fatto un confronto tra la il decreto D.M 1975 e i risparmi di energia ottenibili dall'utilizzo dei due sistemi differenti.

Il primo passo dell'analisi energetica consiste nel calcolo della temperatura dell'aria in ingresso dopo che è passata attraverso il recuperatore, per farlo si parte dalla equazione di efficienza dello scambiatore:

$$\varepsilon_R = \frac{\dot{q} \rho C_p (T - T_{out})}{\dot{q} \rho C_p (T_{progetto} - T_{out})} \quad (5.1)$$

con:

\dot{q} = portata volumetrica di ventilazione [m^3/s]

ρ = densità dell'aria [kg/m^3]

C_p = calore specifico a pressione costante dell'aria [$J/(kgK)$]

T = temperatura reale dell'aria all'uscita dallo scambiatore [K]

T_{out} = temperatura dell'aria esterna [K] (presa da "Banca dati meteorologica"[44])

$T_{progetto}$ = temperatura interna invernale di progetto [K]

Nel calcolo si è considerato il caso realistico in cui l'aria ha densità diverse al variare della temperatura, quindi l'aria in ingresso, più fredda avrà una densità $\rho(T_{in})$ maggiore rispetto a quella in uscita $\rho(T_{out})$. In tabella 5.10 sono elencate le varie densità utilizzate.

Quindi la temperatura reale dell'aria all'uscita dello scambiatore viene calcolata come:

$$T = \varepsilon_R \frac{\rho(T_{out})}{\rho(T_{in})} (T_{progetto} - T_{out}) + T_{out} \quad [^{\circ}C] \quad (5.2)$$

T [°C]	ρ [kg/m ³]
20	1,204
15	1,225
10	1,247
5	1,269
0	1,292
-5	1,316

Tabella 5.10 Densità dell'aria in funzione della temperatura

Il passo successivo è quello di calcolare la potenza termica \dot{Q} [W] necessaria da fornire per portare l'aria dalla temperatura T alla temperatura interna di progetto $T_{progetto}$, per farlo si usa la seguente reazione:

$$\dot{Q} = \dot{q} \rho C_p (T_{progetto} - T) \quad [W] \quad (5.3)$$

Se si considera che questa potenza [W] viene applicata in modo continuativo per tutta l'ora allora si parla di energia [Wh].

A questo punto si vanno a sommare tutti gli apporti di energia calcolati per ognuna delle 665 ore di funzionamento dell'impianto; i cui risultati sono mostrati in tabella 5.11

	ENERGIA TERMICA E_T [kWh]	
	875 m ³ /h	525 m ³ /h
08:00	141,10	74,20
09:00	124,14	64,41
10:00	106,99	54,19
11:00	91,99	45,36
12:00	81,34	39,25
13:00	72,19	34,01
TOTALE	529,5	266,9

Tabella 5.11 Energia termica totale da fornire per due portate di ventilazione diverse durante il periodo invernale in una scuola superiore con DV

Ipotizzando ora di fornire questa energia termica attraverso una pompa di calore con un COP di 2,5, l'energia elettrica da fornire alla pompa di calore E_{Ep} [kWh] necessaria a

coprire tutto il carico di ventilazione si ricava tramite la seguente relazione:

$$E_{E_p} = \frac{E_T}{COP} \quad [Wh] \quad (5.4)$$

ENERGIA ELETTRICA PDC E_{E_p} [kWh]	
875 m ³ /h	525 m ³ /h
211,8	106,8

Tabella 5.12 Energia elettrica da fornire a una Pompa Di Calore (COP 2,5) per due portate di ventilazione diverse durante il periodo invernale in una scuola superiore con DV

La potenza elettrica che il ventilatore assorbe P_{E_v} per immettere la portata di aria si calcola come:

$$P_{E_v} = \frac{q \Delta P}{\varepsilon_v} \quad [W] \quad (5.5)$$

Dall'ipotesi effettuate inizialmente si suppone che l'impianto di ventilazioni mandi la stessa portata in maniera continuativa per tutte le ore di lezione del periodo invernale quindi l'energia elettrica necessaria per il funzionamento del ventilatore E_{E_v} :

ENERGIA ELETTRICA VENTILATORE E_{E_v} [kWh]	
875 m ³ /h	525 m ³ /h
80,73	48,44

Tabella 5.13 Energia elettrica da fornire ad ventilatore ($\varepsilon_v = 0,7$) per due portate di ventilazione diverse durante il periodo invernale in una scuola superiore con DV

L'energia elettrica totale E_E necessaria per la ventilazione di un'aula superiore lungo tutto il periodo invernale sarà quindi data dalla somma:

$$E_E = E_{E_p} + E_{E_v} \quad [Wh] \quad (5.6)$$

In tabella 5.14 viene mostrata l'energia elettrica totale E_E che serve per il funzionamento dell'impianto di ventilazione a dislocamento per due diverse portate di aria in una scuola superiore durante il periodo invernale.

ENERGIA ELETTRICA TOTALE E_E [kWh]	
875 m ³ /h	525 m ³ /h
292,53	155,21

Tabella 5.14 Energia elettrica totale per due portate di ventilazione diverse durante il periodo invernale in una scuola superiore con DV

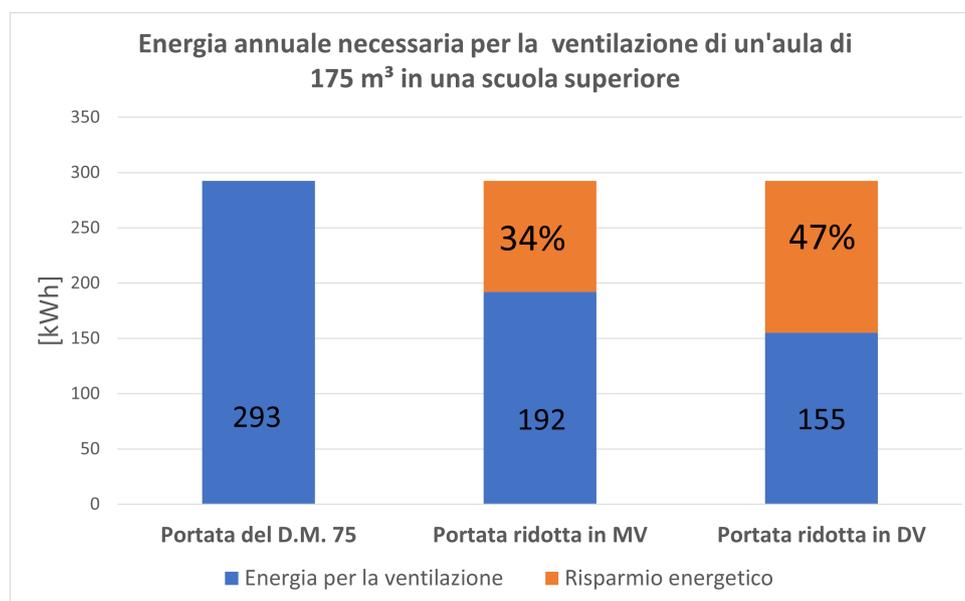


Figura 5.23 Confronto tra MV e DV del risparmio energetico dovuto alla diminuzione della portata di ventilazione rispetto al D.M. 1975 per una classe di 175 m³ in una scuola superiore

Nel paragrafo precedente si era dimostrato che per ottenere all'interno dell'aula delle condizioni accettabili $CO_2 \approx 1000$ ppm bastasse una portata di 6,6 l/s·persona per MV (70% di quella imposta per legge dal D.M 1975) e 5,6 l/s·persona per DV (60% di quella imposta per legge dal D.M 1975).

Dopo questa analisi è stato quindi possibile stimare l'energia elettrica necessaria per il funzionamento dell'impianto nelle condizioni prescritte dal D.M 75 e nelle nuove 2 configurazioni di portata ridotta.

Nel grafico in figura 5.23 viene rappresentata in blu l'energia elettrica necessaria per il funzionamento dell'impianto di ventilazione e in arancio il risparmio rispetto al D.M 75 che ne consegue riducendo le portate pur mantenendo un valore accettabile di CO_2 interna di 1000 ppm. Si nota come tra le due soluzioni quella che garantisce i risparmi energetici maggiori è la ventilazione a dislocamento con un risparmio annuale stimato a 47% a fronte del 34% della ventilazione a completa miscelazione.

Considerando che tali risparmi di energetici sono relativi solamente a una classe, se si considera un istituto superiore con una decina di sezioni, è evidente che i risparmi ottenuti sono considerevoli.

Le considerazioni fatte fino a questo punto sono riferite al solo caso invernale, quindi nel periodo che va dal 15 ottobre 2021 al 15 aprile 2022. Per i restanti giorni dell'anno scolastico, non è necessario l'utilizzo della pompa di calore per riscaldare l'aria in ingresso, quindi il consumo di energia totale sarà dato solo dal funzionamento del ventilatore.

Inoltre nel periodo primaverile è possibile sfruttare il *free-cooling*, ovvero utilizzare l'aria esterna, che in questo periodo non è troppo fredda, per raffrescare l'ambiente tramite la ventilazione.

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

Lo scopo del presente lavoro di tesi è stato quello di studiare due strategie di ventilazione meccanica facilmente installabili tramite interventi di riqualificazione nelle aule scolastiche per adeguare la qualità dell'aria degli ambienti interni agli standard europei e mondiali. Dapprima è stata svolta una ricerca sullo stato dell'arte relativa alla IAQ e alle varie strategie di ventilazione in un locale: la ventilazione a completa miscelazione, *mixing ventilation* (MV) e la ventilazione a dislocamento *displacement ventilation* (DV).

Tramite un'analisi su oltre 150 scuole elementari/medie/superiori situate nei comuni di Livorno e Reggio Emilia sono state estrapolate le misure per la definizione di una "aula tipo". Dato che l'altezza della stanza gioca un ruolo fondamentale nel funzionamento della ventilazione, a seguito di questa analisi statistica, è stato deciso di studiare due aule differenti, la prima con altezza di 2,7 m corrispondente agli edifici più moderni, e la seconda di 3,5 m per gli edifici di vecchia costruzione. In queste due stanze sono stati implementati separatamente i due sistemi di ventilazione studiati, ottenendo così un totale di 4 modelli per l'analisi CFD.

Nella prima parte della tesi, per ognuno di questi 4 modelli, sono stati utilizzati 3 differenti impostazioni dei parametri (riproducendo la ventilazione per una scuola elementare/media/superiore in periodo invernale) per un totale complessivo di 12 simulazioni CFD. I risultati ottenuti nella prima parte hanno portato alle seguenti considerazioni:

- Un ambiente densamente affollato, come un'aula scolastica, isolato discretamente $U_{\text{parete}} = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{\text{finestra}} = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ e con una sola superficie disperdente ha un bisogno quasi nullo di energia per il riscaldamento.
- A parte per i casi di scuola elementare e media con altezza di 2,7 m, la ventilazione a dislocamento fornisce dei risultati in termini di IAQ migliori rispetto al sistema decentralizzato a completa miscelazione. Non solo, dalle analisi svolte sulla velocità

dell'aria si evince come la ventilazione a completa miscelazione porti ad un'alta probabilità di discomfort per correnti d'aria *Draught Rate*.

- Il sistema decentralizzato posto sopra alla finestra per la ventilazione a completa miscelazione non riesce a creare un mescolamento dell'aria adeguato all'interno dell'aula con la conseguente formazione di zone di ristagno dove la qualità dell'aria non è soddisfacente.

Tali considerazioni portano a suggerire l'utilizzo della tecnologia a dislocamento negli interventi di costruzione o retrofit di sistemi di ventilazione nelle aule scolastiche.

Note queste considerazioni, è stata fatta variare la posizione della bocchetta di ripresa dell'aria per entrambe le tecnologie di ventilazione con i seguenti risultati:

- Sia nel caso della ventilazione a completa miscelazione che nel caso di quella a dislocamento si nota che, con una semplice modifica della posizione di ripresa dell'aria, è possibile diminuire la differenza di CO₂ tra interno ed esterno fino a 100 ppm.
- Entrambi i sistemi sono certamente influenzati dalla posizione della ripresa, parametro da non sottovalutare in fase progettuale. A parità di condizioni di qualità dell'aria interna, una posizione ben studiata richiede al sistema di ventilazione di trattare una minor quantità di aria permettendo di ottenere un risparmio energetico per il carico di ventilazione. Ad esempio, in un'aula di altezza 3,5 m e con un volume di 175 m³ di una scuola media con la bocchetta in POSIZIONE 2 si registrano le stesse concentrazioni di CO₂ ottenute con la POSIZIONE 1 ma con una diminuzione della portata di ventilazione da 6,54 l/s · persona (stabilita dal D.M. 1975) a 5,4 l/s · persona sia per MV che DV con una diminuzione della quantità di aria da trattare del 17% .

Nella terza ed ultima parte è stata svolta un'analisi critica dei parametri di legge. A partire dalle prescrizioni del D.M. 1975 è stata fatta variare la portata fino a ottenere un valore limite di 1000 ppm per entrambi i sistemi di ventilazione in seguito, per finire, si è svolta una rapida analisi energetica. Dai risultati ottenuti si possono quindi trarre le seguenti considerazioni.

- In un'aula di altezza 3,5 m e con un volume di 175 m³ di una scuola superiore è possibile ridurre la portata ventilazione da 9,4 l/s · persona (stabilita dal D.M. 1975) a 6,6 l/s · persona per MV e 5,6 l/s · persona per DV mantenendo comunque condizioni di IAQ interne accettabili (CO₂ relativa tra interno ed esterno ≤ 500 ppm).
Da tale riduzione di portata ne consegue un risparmio annuale di energia elettrica per il funzionamento dell'impianto di ventilazione del 34% in MV e 47% in DV.

Possibili considerazioni future potrebbero essere:

- Una corretta valutazione economica delle strategie di ventilazione degli edifici dovrebbe considerare non solo i costi di capitale iniziali ed i costi energetici in uso associati, ma anche gli impatti sulle performance e sul benessere degli studenti. Queste però richiede la monetizzazione di tali impatti per consentire la loro inclusione in analisi come ad esempio quella del Costo del Ciclo di Vita (Life Cycle Analysis). L'investimento sulla ventilazione meccanica è molto oneroso sia in termini impiantistici che operativi e purtroppo non ha un effetto utile immediato come un intervento sull'isolante della copertura che permette fin da subito di risparmiare energia per il riscaldamento.
- Le analisi fatte sulle aule elementari/media/superiori si riferiscono ad una ipotetica scuola situata a Torino dove le temperature invernali sono più severe rispetto a quelle nel centro-sud Italia. Pertanto sarebbe interessante espandere l'analisi per le restanti aree geografiche italiane cercando di rendere il sistema di ventilazione non più esclusivamente meccanico ma sfruttare anche l'aerazione naturale.

Bibliografia

- [1] Prof. Ing. Antonino Nucara. La qualità dell'aria indoor, 2010/2011.
- [2] Éva Csobod, Péter Rudnai, and E Vaskovi. School environment and respiratory health of children (search) international research project report within the “ indoor air quality in european schools : Preventing and reducing respiratory diseases program ”. 2010.
- [3] Nicolas Seary e Hussam Johura Tom Lipinski, Darem Ahmad. Review of ventilation, 2021. Available on line.
- [4] Michele Vio. Gli impianti di climatizzazione e il rischio di contagio, 2020.
- [5] Atzeri Anna Maria Zancarli Mirko, Bancher Mariadonata. Qaes, sviluppo di linee guida di progettazione sulla qualità dell'aria all'interno degli edifici scolastici, 2018.
- [6] ALDES. A scuola con aldes, purificazione dell'aria, 2020.
- [7] Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Uni en 16890:2017 filtri d'aria per ventilazione generale - parte 1: Specifiche tecniche, requisiti e sistema di classificazione dell'efficienza basato sul particolato (epm), 2017.
- [8] PRICE. Engineering guide displacement ventilation, 2016.
- [9] *Contaminant Distribution Around Persons in Rooms Ventilated by Displacement Ventilation*. Number 40 in Indoor Environmental Technology. Dept. of Building Technology and Structural Engineering, 1994.
- [10] S.P. Corgnati M.Filippi. Displacement ventilation: funzionamento e progetto. dipartimento di energetica-Politecnico di Torino.
- [11] AICARR. *Le nuove frontiere della ventilazione - Ventilazione a dislocamento in ambienti non industriali*. AICARR, 2004.
- [12] M. Mundt, H. M. Mathisen, M. Moser, and Peter V. Nielsen. *Ventilation Effectiveness: Rehva Guidebooks*. Number 2 in Rehva Guidebook. Federation of European Heating and Ventilation Association, 2004.
- [13] Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Ergonomia degli ambienti termici - determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici pmv e ppd e dei criteri di benessere termico locale (uni en iso 7730), 2006.
- [14] Ministero dell'Istruzione e del Merito. Edilizia scolastica. Available on line.

- [15] Annamaria Belleri Chiara Ugolini. Qaes, qualità dell'aria negli edifici scolastici, indagine sullo stato dell'arte: criteri e parametri che influenzano la qualità dell'aria negli edifici scolastici, 2019.
- [16] European Environment Agency. Trends in atmospheric concentrations of co2 (ppm), ch4 (ppb) and n2o (ppb), between 1800 and 2017. Available on line.
- [17] QAES. Tool di autodiagnosi qualità aria interna. Available on line.
- [18] Istituto Superiore di Sanità. Rapporto 16/15: Presenza di co2 e h2s in ambienti indoor: attuali conoscenze e letteratura scientifica, 2016.
- [19] Gazzetta ufficiale della repubblica. Decreto ministeriale 18 dicembre 1975, norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica, 1975.
- [20] Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Uni 10339:1995 impianti aeraulici al fini di benessere. generalità, classificazione e requisiti. regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura., 1995.
- [21] Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Uni en 16798-1:2019 prestazione energetica degli edifici - ventilazione per gli edifici - parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica, 2019.
- [22] Luca Pmapuri, Tiziano Teruzzi, Clara Perettiand Gianmaria Fulci, Mirko Zancarli, and Francesca Avella. Che aria tira nelle nostre scuole. 2021.
- [23] Bruinen De Bruin Kephelopoulos, Csobod. Guidelines for healthy environments within european schools. 2014.
- [24] U. Haverinen-Shaughnessy, D. J. Moschandreas, and R. J. Shaughnessy. Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air*, 21(2):121–131, 2011.
- [25] Erika Seghetti. La scuola ai tempi del coronavirus, quali soluzioni? *AICARR*, 2020.
- [26] A. Norhidayah, Lee Chia-Kuang, M.K. Azhar, and S. Nurulwahida. Indoor air quality and sick building syndrome in three selected buildings. *Procedia Engineering*, 2013.
- [27] Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Uni en 16798-3:2018 prestazione energetica degli edifici - ventilazione per gli edifici - parte 3: Per gli edifici non residenziali - requisiti prestazionali per i sistemi di ventilazione e di condizionamento degli ambienti, 2018.
- [28] Commissione europea. Health effects of school environment (hese), 2006.
- [29] Dimosthenis A. Sarigiannis, Spyros P. Karakitsios, Alberto Gotti, Ioannis L. Liakos, and Athanasios Katsoyiannis. Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in european indoor environments and associated health risk. *Environment International*, 37(4):743–765, 2011.

- [30] Pawel Wargocki and David 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 Research*, 13(2):165–191, 2007.
- [31] AICARR. *Ambiente interno ed efficienza energetica negli edifici scolastici*. AICARR, 2011.
- [32] Sean P. Meyn, Amit Surana, Yiqing Lin, Stella Maris Oggianu, Satish Narayanan, and Thomas A. Frewen. A sensor-utility-network method for estimation of occupancy distribution in buildings. 2009.
- [33] Walid Chakroun, Sorour Alotaibi, Carine Habchi, Kamel Ghali, and Nesreen Ghaddar. Comparison of removal effectiveness of mixed versus displacement ventilation during vacuuming session. *Building and Environment*, pages 118–126, 2019.
- [34] Gazzetta ufficiale della repubblica. Criteri ambientali minimi per l’affidamento del servizio di progettazione ed esecuzione dei lavori di interventi edilizi, 2022.
- [35] Ing. Gian Luca Guerrini. L’indoor air quality (iaq) nelle scuole. *INGENIO*, 2021.
- [36] C.Tambani L. Schibuola. Monitoraggio continuo delle concentrazioni di co2 i/e permette di calcolare la ventilazione di ogni classe con un modello basato sul bilancio interno della co2. *AICARR*, 2021.
- [37] Simscale. What is simscale, 2023. Available on line.
- [38] Simscale. K-omega and k-omega sst, 2021. Available on line.
- [39] Simscale. What is a mesh, 2023. Available on line.
- [40] Simscale. Wall boundary condition, 2022. Available on line.
- [41] AICARR. *Manuale d’ausilio alla progettazione termotecnica. Miniguia AICARR*. AICARR, 2010.
- [42] L. de Jonge² A. Persily¹. Carbon dioxide generation rates for building occupants. 2017.
- [43] Engineering ToolBox. Air - diffusion coefficients of gases in excess of air, 2018. Available on line.
- [44] ARPA-Piemonte. banca dati meteorologica. Available on line.