

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

TESI DI LAUREA MAGISTRALE



**VENTILAZIONE MECCANICA CONTROLLATA:
ASPETTI ENERGETICI, FUNZIONALI E MANUTENTIVI.**

Relatori:

**Prof. Giovanni Vincenzo Fracastoro
Prof. Marco Carlo Masoero**

Candidato:

Fabrizio Mattotea

Dicembre 2018

A Milena, Cecilia, Edoardo e Letizia

Ringraziamenti

Il percorso che mi ha condotto al traguardo della Laurea Magistrale è stato piuttosto lungo e articolato, intersecandosi con l'attività professionale e con la crescita della famiglia.

Ringrazio tutte le persone che mi hanno accompagnato e aiutato in particolare nei momenti più difficili e faticosi di questo percorso.

Esprimo gratitudine al prof. Gianvincenzo Fracastoro che non ha mai mancato nel fornire un valido appoggio fin dai primi anni degli studi al Politecnico, e al prof. Marco Carlo Masoero per la disponibilità e per la preziosa collaborazione nella stesura della tesi.

Un ringraziamento particolare va all'ing. Alberto Colucci con il quale ho potuto condividere importanti scelte durante il percorso.

Ringrazio con profondo affetto tutta la mia famiglia, specialmente mia moglie Milena e i miei figli che hanno condiviso con me la fatica dello studio e la gioia dei piccoli o grandi risultati lungo il cammino, con un costante incoraggiamento per il raggiungimento dell'obiettivo finale.

Infine, grazie agli amici più cari.

Prefazione

Sulla base di esperienze professionali vissute in prima persona e facendo riferimento a documentazione e letteratura specifici nel settore termotecnico si riscontra che il tema del trattamento dell'aria diviene sempre più attuale sia per gli aspetti di igiene, sia per gli aspetti termofisici legati all'edificio.

Questa tesi vuole affrontare il tema della ventilazione meccanica controllata come possibile soluzione alle problematiche di trattamento dell'aria, integrata nel sistema edificio-impianto, in particolare nei casi di edifici esistenti. E' proprio in questa situazione infatti che, in seguito a interventi di coibentazione quali ad esempio l'installazione di cappotto termico, sostituzione di serramenti, coibentazione di solai, si riducono i ricambi d'aria dovuti a infiltrazioni, con la generazione di problematiche sull'approvvigionamento di aria di rinnovo e sul controllo della qualità dell'aria interna agli ambienti.

Pur trattandosi di una materia generale applicabile a qualsiasi tipologia di edificio, nell'elaborato di tesi si vuole porre una particolare attenzione agli ambienti destinati ad uso scolastico.

Nella prima parte dell'elaborato si intende esaminare soluzioni e tecnologie evolute in termini di efficienza energetica e in termini di funzionalità tecnica per i sistemi di ventilazione meccanica controllata per applicazioni di tipo civile, in particolare per edifici pubblici

Nella seconda parte si intende valutare l'applicazione di un sistema di ventilazione meccanica controllata ad un "caso pratico" da individuare possibilmente in un edificio scolastico di cui si conoscono le caratteristiche del sistema edificio-impianto in base all'attività professionale del sottoscritto.

INDICE

1. PREMESSA E QUADRO NORMATIVO	1
1.1 Premessa	1
1.2 Ventilazione meccanica: principi generali	5
1.3 Situazione normativa europea	6
1.4 Situazione normativa nazionale	8
1.4.1 Salubrità dell'aria.....	8
1.4.2 Aspetti energetici	12
1.4.3 Controllo e regolazione	17
1.4.4 Regolamenti e norme locali sull'edilizia	19
1.4.5 Edilizia scolastica: D.M. 18/12/1975	20
1.4.6 Altri riferimenti a norme tecniche	22
2 ELEMENTI DI BASE PER LA PROGETTAZIONE.....	25
2.1 Il benessere termoigrometrico.....	25
2.1.1 Gradiente verticale di temperatura.....	29
2.1.2 Temperatura del pavimento	29
2.1.3 Velocità d'aria	30
2.1.4 Valori asimmetrici della temperatura piana radiante.....	31
2.2 Salubrità dell'aria	33
2.2.1 Agenti inquinanti esterni	34
2.2.2 Agenti inquinanti interni	36
2.2.3 Azioni per la riduzione degli agenti inquinanti	40
2.2.4 La CO ₂ come indicatore di benessere	42
2.3 La filtrazione dell'aria.....	44
2.4 Sindrome dell'edificio malato (SBS)	48
2.5 Il progetto S.E.A.R.C.H.	50
3 EFFICIENZA ENERGETICA NELLA VENTILAZIONE	53
3.1 La ventilazione nel bilancio energetico dell'edificio.....	53
3.2 Le infiltrazioni di aria.....	58
3.3 Recupero termico nella ventilazione	60
3.3.1 Recuperatore statico aria/aria a piastre	62

3.3.2	<i>Recuperatore a batterie accoppiate</i>	64
3.3.3	<i>Recuperatore rotativo</i>	65
3.3.4	<i>Recupero termico con pompe di calore</i>	67
3.4	Efficienza di ventilazione.....	70
4	IL PROGETTO DELL'IMPIANTO E LA MANUTENZIONE	77
4.1	Impostazione del progetto.....	78
4.2	Calcolo delle portate di aria.....	80
4.3	Verifica del carico termico.....	83
4.4	Il sistema di immissione ed estrazione dell'aria.....	87
4.5	Le macchine per il trattamento dell'aria.....	89
4.6	Il sistema di distribuzione.....	92
4.7	La regolazione e il controllo dell'impianto.....	94
4.8	La manutenzione.....	95
5	IL CASO STUDIO	99
5.1	Caratteristiche dell'edificio.....	99
5.2	Impianto termico esistente.....	103
5.3	Impianto di ventilazione in progetto.....	104
5.3.1	<i>Unità di ventilazione</i>	104
5.3.2	<i>Sistema di distribuzione</i>	105
5.3.3	<i>Sistema di immissione ed estrazione</i>	106
5.3.4	<i>Sistema di regolazione</i>	107
5.4	Benefici energetici.....	107
5.5	Valutazione dei costi.....	110
6	CONCLUSIONI	113
7	FONTI E BIBLIOGRAFIA	117

1. PREMESSA E QUADRO NORMATIVO

1.1 Premessa

Il tema del ricambio e del trattamento dell'aria negli ambienti confinati assume un ruolo determinante in fase di progettazione nel sistema edificio-impianto, in particolare per edifici di nuova costruzione in cui gli standard costruttivi inducono a un fabbisogno energetico limitato in termini di riscaldamento e di raffrescamento, e per conseguenza la componente energetica legata alla ventilazione assume una rilevanza significativa.

Oltre alle nuove costruzioni, anche nelle situazioni di ristrutturazione e riqualificazione energetica di edifici esistenti, l'impiego di componenti edilizie sempre più avanzate per la coibentazione dell'involucro induce all'annullamento delle infiltrazioni d'aria che, se non accompagnate da opportuni interventi sulla gestione dei ricambi d'aria, possono generare problemi sull'edificio. In numerose situazioni infatti non è sufficiente affidare all'utente o occupante dei volumi climatizzati la funzione di controllo e gestione dei ricambi d'aria mediante azioni volontarie (e quindi soggettive) per la ventilazione naturale (ad esempio, al raggiungimento di un certo tasso di "odore" aprire una finestra).

La principale soluzione tecnologicamente valida, pur non essendo l'unica, in questi casi è l'introduzione di sistemi di ventilazione meccanica, finalizzati ad una corretta gestione dei ricambi d'aria, all'efficienza energetica e al mantenimento degli standard sulle caratteristiche

della salubrità dell'aria all'interno degli edifici, con gli opportuni accorgimenti nel gestire le componenti dell'inquinamento generato nell'ambiente interno e quello indotto dagli apporti di aria di rinnovo dall'esterno mediante sistemi di filtrazione adeguati.

Nella trattazione, oltre a una caratterizzazione generale degli aspetti legati alla ventilazione meccanica controllata, si terrà in considerazione la situazione particolarmente delicata degli ambienti in **edifici scolastici**, in cui la sempre più frequente applicazione di interventi di riqualificazione (inclusa la sostituzione di serramenti) determina condizioni critiche dal punto di vista del ricambio dell'aria.

A supporto delle motivazioni che conducono allo svolgimento di questo elaborato, si cita un esempio relativo a una misurazione effettuata sul campo in un'aula del Politecnico di Torino destinata allo svolgimento di lezione (AULA 25) svolta nel giorno di 08/05/2017: i dati raccolti consentono di evidenziare quanto sia determinante il tema del ricambio dell'aria negli ambienti destinati ad utilizzo scolastico (*attività svolta nel corso di Comfort and Energy Saving in Buildings, a.a. 2016/2017, prof. G.V. Fracastoro*).

Uno degli indicatori utilizzati per quantificare e valutare la qualità dell'aria con particolare riferimento all'inquinamento indoor è la concentrazione di anidride carbonica (CO₂). Il corpo umano infatti emette in ambiente come prodotti di scarto quantità di anidride carbonica e vapore d'acqua in modo proporzionale al livello di attività fisica svolta dalla persona. Tali composti sono il risultato dell'ossidazione di carbonio e idrogeno contenuti nei cibi. La concentrazione di CO₂ è un indicatore che sottende in modo proporzionale la presenza di una quantità di altre sostanze "inquinanti" endogene di cui tenere conto.

Questo argomento sarà approfondito nel seguito della trattazione.

La prova eseguita consiste nell'analisi della variazione della concentrazione di CO₂ (in ppm) nel tempo in base alla ventilazione del locale e in base al numero delle persone presenti.

I dati sono illustrati nel grafico riportato in figura 1.1.

La concentrazione di CO₂ misurata nell'ambiente esterno è pari a circa 400 ppm. La concentrazione misurata nel corridoio prima dell'accesso all'aula è pari a 1100 ppm.

La prova eseguita è caratterizzata dalle seguenti fasi:

FASE 1 – Transitorio da inizio lezione fino al valore stabile

A partire dall'inizio della lezione sono presenti 60 studenti ed è stimato un valore di portata di ricambio d'aria pari a 0,65 vol/h (due finestre aperte a vasistas). Dopo circa 40 minuti la concentrazione di CO₂ raggiunge il valore di 4700 ppm per poi stabilizzarsi. Nelle condizioni ambientali descritte l'andamento medio dell'incremento della concentrazione è stato di circa 42 ppm/min.

FASE 2 – Situazione stazionaria

Al raggiungimento del valore di 4700 ppm si mantiene una condizione di equilibrio (stazionario) fino al successivo cambiamento dei parametri ambientali.

FASE 3 – Chiusura finestre (secondo transitorio)

La prova prosegue con la chiusura delle finestre annullando di fatto il ricambio di aria (valore calcolato di 0,05 vol/h), mantenendo comunque all'interno la presenza di 60 persone. In queste condizioni si raggiunge linearmente nel tempo un picco di concentrazione di CO₂ di 5650 ppm in un tempo di circa 20 minuti, con un incremento medio di 43 ppm/min.

FASE 4 – Chiusura finestre (secondo transitorio)

Successivamente tutte le persone escono dall'aula e si riscontra un andamento lievemente decrescente della concentrazione, dovuto all'assenza di ricambio d'aria (finestre mantenute chiuse). Il valore finale, dopo 25 minuti è comunque piuttosto elevato (5327 ppm).

FASE 5 – Aerazione completa del locale

A conclusione della prova vengono aperte tutte le finestre per una aerazione totale dell'aula (in assenza di persone all'interno). In un tempo piuttosto ridotto (5 minuti) si raggiunge un valore di concentrazione di 1800 ppm.

Ai fini della classificazione della qualità dell'aria, la norma UNI EN 13779:2008 definisce un valore limite di differenza di concentrazione di CO₂ tra ambiente esterno e interno pari a 1000 ppm (classe Bassa – IDA = 3).

Da una analisi del caso reale analizzato risultano pertanto evidenti i seguenti aspetti:

- La variazione delle condizioni ambientali della qualità dell'aria è piuttosto significativa in tempi anche brevi in funzione dell'utilizzo effettivo dei locali, generando transitori repentini

- Il superamento delle soglie di comfort (classe di qualità dell'aria) come definito dalla norma è frequente
- La gestione dei ricambi dell'aria ai fini di un controllo della qualità dell'aria ambiente è affidata all'accortezza e alla sensibilità degli occupanti, con una forte componente soggettiva che non sempre induce a una adeguata portata di aria di rinnovo
- Il ricambio dell'aria in modalità "manuale" con apertura di finestre verso l'esterno (ventilazione naturale) non consente un corretto controllo termoigrometrico dell'aria ambiente, elemento che incide sull'efficienza energetica

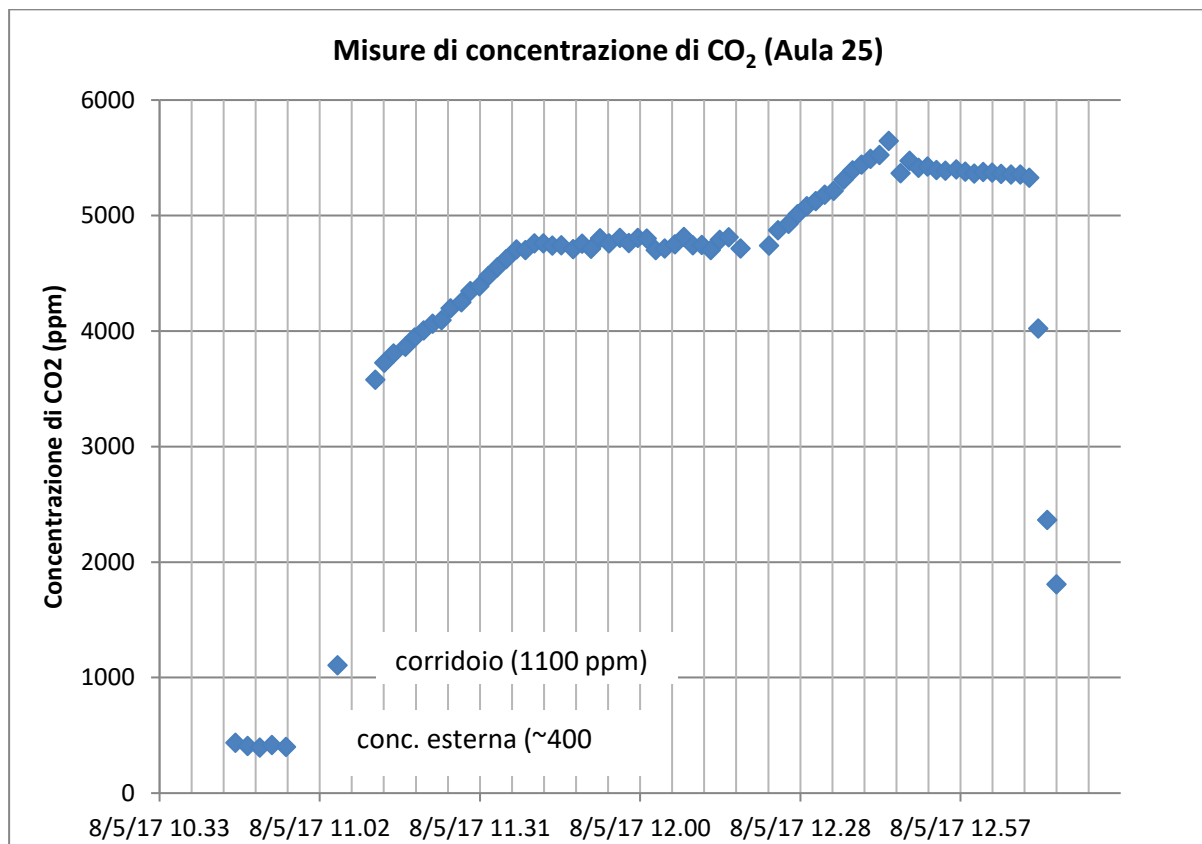


Fig. 1.1 – Prova sperimentale Concentrazione di CO₂ Aula 25 Politecnico di Torino

L'esempio numerico sopra descritto può essere esemplificativo rispetto a numerose situazioni, soprattutto in ambito scolastico, in cui la gestione dei ricambi d'aria è affidata ai singoli utenti dei locali e pertanto senza un effettivo controllo e regolazione, con una scarsa attenzione agli aspetti sanitari ed energetici che ne derivano.

1.2 Ventilazione meccanica: principi generali

La ventilazione meccanica controllata (VMC) è la funzione che consente di controllare il ricambio dell'aria in un ambiente confinato delimitato da un involucro edilizio; in termini impiantistici questo concetto si traduce nell'insieme dei seguenti sotto-sistemi:

1. Sistema di aspirazione dell'aria dall'esterno
2. Sistema di trattamento dell'aria comprensivo di elementi filtranti, batterie di scambio termico per il controllo della temperatura e dell'umidità, eventuale recuperatore di energia termica, ventilatori
3. Sistema di canali per la distribuzione dell'aria di rinnovo
4. Sistema di emissione dell'aria (bocchette, anemostati etc...)
5. Sistema di aspirazione aria dagli ambienti e relativa canalizzazione
6. Sistema di espulsione dell'aria estratta all'esterno comprensivo di eventuale sistema di filtrazione
7. Sistema di regolazione e controllo delle portate dell'aria di tipo retro-attivo in funzione del rilevamento dei parametri ambientali

In senso esteso si considerano facenti parte del sistema anche i generatori per la produzione di energia termica generalmente sottoforma di acqua calda e fredda che alimentano le batterie delle unità di trattamento aria per le trasformazioni psicrometriche necessarie. Sotto il profilo energetico l'attenzione si pone sulle portate e sulle caratteristiche termo-igrometriche dell'aria trattata, valutando quindi l'energia primaria in ingresso ai generatori e al sistema di ventilazione. A questo proposito la presenza di scambiatori di recupero termico, un accurato controllo delle condizioni indoor, la presenza di motori ad elevata efficienza nel sistema di ventilazione sono elementi fondamentali per il conseguimento di elevata efficienza e di un costo energetico sostenibile nella gestione dell'impianto.

Per quanto riguarda il benessere degli ambienti interni le norme tecniche di settore definiscono in primo luogo i requisiti per conseguire opportune condizioni di salubrità in funzione della destinazione d'uso degli edifici e dei locali serviti dall'impianto. Onde evitare l'insorgere di problematiche e di disagio per gli occupanti è inoltre necessario definire corretti valori della velocità dell'aria e della geometria del sistema di distribuzione e di emissione.

1.3 Situazione normativa europea

A partire dal Protocollo di Kyoto siglato nel dicembre 1997, l'attenzione agli aspetti energetici, al risparmio e all'efficienza è stata progressivamente tradotta dai principali Paesi del mondo in azioni sempre più incisive e concrete anche nel settore edilizio, ponendo obiettivi di riduzione percentuale delle emissioni di CO₂ e gas inquinanti in ben precisi step temporali. Tralasciando in questa sede le fasi intermedie si vuole riassumere brevemente la situazione attuale di riferimento da cui trarre spunto per le considerazioni che seguiranno nei paragrafi successivi.

Uno dei principali “pilastri” della attuale normativa in ambito di efficienza energetica negli edifici è la direttiva europea **2010/31/UE** (data di entrata in vigore: 08/07/2010 e data limite di recepimento da parte degli stati Membri: 09/07/2012). La direttiva si pone come strumento condiviso per il raggiungimento di una riduzione dei consumi di energia del 20% entro il 2020 con il fine ultimo di ridurre la dipendenza energetica e le emissioni di gas serra nell'Unione. La direttiva affida ai Governi degli Stati Membri la definizione di requisiti minimi per la prestazione energetica del sistema edificio-impianto nel caso di nuove costruzioni o di ristrutturazioni importanti su edifici esistenti, introducendo in modo particolarmente significativo il tema della ventilazione (unitamente a riscaldamento, produzione a.c.s., condizionamento e illuminazione). Nella citata direttiva vengono introdotti anche il criterio per la definizione di “edificio a energia quasi zero” e il tema della sostenibilità economica degli interventi, presente all'interno della direttiva e acquisito dagli Stati Membri con la caratterizzazione di sistemi di incentivazione per il conseguimento degli obiettivi. (*fonte Eur-Lex <https://eur-lex.europa.eu>*).

La direttiva **2012/27/UE** (data di entrata in vigore 04/12/2012) rappresenta un ulteriore rafforzamento e conferma della precedente, oltre all'abrogazione di documenti antecedenti e non più coerenti con il quadro europeo 2004/8/UE e 2006/32/UE. La direttiva promuove l'efficienza energetica in tutta l'Unione attraverso un quadro comune di misure che riguardano ogni fase della catena dell'energia, dalle operazioni di trasformazione e distribuzione fino al consumo finale. L'obiettivo rimane il raggiungimento della riduzione del fabbisogno di energia del 20% rispetto al 1990 entro il 2020, introducendo l'obbligo per gli Stati Membri di fissare obiettivi di riduzione dei consumi entro il 2020 coinvolgendo anche i fornitori di energia. Un ruolo particolarmente significativo è previsto per gli Enti Pubblici ritenuti “esemplari” nello

sviluppo di processi volti all'incremento dell'efficienza energetica, incentivando una trasformazione di mercato verso prodotti, servizi e, nel complesso, edifici più efficienti. Con rimando alla direttiva 2010/31/UE è previsto l'obbligo per ogni Stato Membro di effettuare interventi di ristrutturazione ogni anno sul 3% della superficie totale degli edifici di proprietà pubblica.

L'intenzione del legislatore prevede che ogni Stato Membro definisca una strategia di lungo termine per finanziare la ristrutturazione degli edifici pubblici e privati.

La direttiva contribuisce agli sforzi che l'Unione Europea compie per ridurre la propria dipendenza dall'importazione di energia e dalla scarsità di risorse energetiche, contrastando al contempo il cambiamento climatico attraverso la riduzione delle emissioni di gas serra in modo economicamente efficace. Accelera inoltre la diffusione di soluzioni tecnologiche innovative e migliora la competitività dell'industria dell'Unione. (fonte Eur-Lex <https://eur-lex.europa.eu>).

La **Direttiva 2018/844/UE** (data di pubblicazione in Gazzetta Ufficiale Europea 19/06/2018) integra e modifica le precedenti 2010/32/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD) e 2012/27/UE sull'efficienza energetica (EED), portando la proiezione temporale delle azioni e della verifica degli obiettivi al 2030 e al 2050 (per il rinnovo del parco edifici). La direttiva dovrà essere recepita dagli Stati Membri entro marzo 2020 e contiene i seguenti obiettivi:

- rendere più efficaci le strategie di ristrutturazione degli immobili a lungo termine che dovranno avere obiettivi chiari e misurabili per un settore edile idealmente decarbonizzato e un parco di edifici NZEB al 2050
- consolidare la componente finanziaria e promuovere investimenti privati per il recupero del patrimonio edilizio esistente
- sostenere lo sviluppo delle infrastrutture per la mobilità con mezzi a propulsione elettrica
- innalzare le soglie per l'obbligo delle ispezioni degli impianti di riscaldamento e di condizionamento dell'aria, confidando nell'apporto dei sistemi automatici di monitoraggio e controllo
- incoraggiare l'uso delle tecnologie elettroniche e informatiche per ottimizzare la gestione dei servizi energetici negli edifici mediante termoregolazione per una maggiore efficienza
- migliorare la trasparenza delle metodologie di calcolo della prestazione energetica definite dagli stati membri
- accrescere il ruolo e la responsabilità dei consumatori finali dei vettori energetici, informandoli e proteggendoli dalla povertà energetica.

(fonte ENEA – www.enea.it)

In particolare al comma 7) la citata direttiva interviene con opportune modifiche alla precedente 2010/31/UE in tema di ispezioni su impianti di riscaldamento e di condizionamento dell'aria. Inoltre, per il raggiungimento degli obiettivi previsti, sarà reso obbligatoria per tutti gli edifici l'applicazione di interventi migliorativi con standard prefissati (e non soltanto in caso di ristrutturazione importante).

1.4 Situazione normativa nazionale

Di seguito sono riportati in sintesi i principali riferimenti normativi che interessano la materia della ventilazione meccanica controllata, con particolare riferimento ai requisiti previsti per le portate di ricambio d'aria negli ambienti, alla quantificazione del contributo energetico dovuto alla ventilazione in fase di progetto, alla definizione delle caratteristiche del sistema di termoregolazione.

1.4.1 Salubrità dell'aria

In merito alla salubrità dell'aria è opportuno tenere conto degli standard normativi ormai consolidati previsti dalla norma **UNI 10339** che, in alcune destinazioni d'uso specifiche, richiederebbero ulteriori integrazioni e/o aggiornamenti. Allo stato attuale detta norma è richiamata come riferimento dagli Uffici Competenti in ambito sanitario (ASL) per verificare le caratteristiche di idoneità dei luoghi ai fini urbanistici per il rilascio dell'agibilità dell'edificio o dell'unità immobiliare.

Nella realtà, con riferimento particolare agli edifici scolastici, si riscontrano situazioni che pur non essendo così distanti dai disposti normativi, richiedono una più approfondita analisi sul piano della ventilazione, con tutte le conseguenze che questo argomento comporta.

Dalla citata norma si ricavano alcune definizioni particolarmente utili per la trattazione in questo elaborato:

Qualità dell'aria: *Caratteristica dell'aria trattata che risponde ai requisiti di purezza. Essa non contiene contaminanti noti in concentrazioni tali da arrecare danno alla salute*

e causare condizioni di malessere per gli occupanti. I contaminanti contenuti sia nell'aria di rinnovo che in quella ricircolata sono gas, vapori, microrganismi, fumo e altre sostanze particolate

Climatizzazione: *Realizzazione e mantenimento simultaneo negli ambienti delle condizioni termiche, igrometriche, di qualità e movimento dell'aria comprese entro i limiti richiesti per il benessere delle persone.*

Condizionamento dell'aria: *Trattamento volto a conseguire la qualità dell'aria e le caratteristiche termo-igrometriche richieste.*

Termoventilazione: *Realizzazione e mantenimento simultaneo negli ambienti delle condizioni di cui al punto "Climatizzazione", escluso il controllo igrometrico.*

Ventilazione: *Realizzazione e mantenimento simultaneo negli ambienti delle condizioni di cui al punto "Climatizzazione", escluso il controllo termico ed, eventualmente, il controllo igrometrico*

Tralasciando in questa sede la parte della norma riferita alle regole per la richiesta dell'offerta, per l'ordine e la fornitura, una parte interessante ai fini della trattazione e richiamata in sintesi ai punti seguenti riguarda i requisiti degli impianti in termini di qualità, portate e movimentazione dell'aria.

Le portate minime di aria esterna per la ventilazione sono indicate nel prospetto III della norma; in relazione agli ambienti destinati ad uso scolastico i valori di riferimento sono indicati nella tabella 1.1.

Nel prospetto IV riportato in tabella 1.2 sono indicati i coefficienti correttivi da moltiplicare alle portate per tenere conto dell'altitudine del sito di installazione sul livello del mare.

Nel prospetto V della norma riportato in tabella 1.3 sono riportati i parametri da adottare per la valutazione dell'efficienza della filtrazione dell'aria.

Categorie di edifici	Portata di aria esterna di estrazione		Note
	Q_{op} ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ per persona)	Q_{os} ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s m}^2$)	
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITA' SCOLASTICHE E ASSIMILABILI			
asili nido e scuole materne	4	-	
aule scuole elementari	5	-	
aule scuole medie inferiori	6	-	
aule scuole medie superiori	7	-	
aule universitarie	7	-	
transiti, corridoi	-	-	
servizi	estrazioni		A
Altri locali:			
biblioteche, sale lettura	6	-	
aule musica e lingue	7	-	
laboratori	7	-	
sale insegnanti	6	-	
<i>Note: A – Ricambio richiesto nei servizi igienici edifici adibiti a residenza e assimilabili 0.0011 vol/s (4 vol/h) altre categorie in tabella 0.0022 vol/s (8 vol/h) il volume è quello relativo ai bagni (antibagni esclusi)</i> <i>B – Verificare i regolamenti locali</i> <i>C – Valori più elevati possono essere richiesti per il controllo dell'umidità</i> <i>D – Per questi ambienti le portate d'aria devono essere stabilite in relazione alle prescrizioni vigenti ed alle specifiche esigenze delle singole applicazioni</i>			

Tab. 1.1 – UNI 10339: prospetto III (estratto)

Altitudine H m s.l.m.	Coefficiente correttivo
0	1.00
500	1.06
1000	1.12
1500	1.18
2000	1.25
2500	1.31
3000	1.38

Tab. 1.2 - UNI 10339: prospetto IV

Classe	Efficienza del filtro E	Campo di efficienza %	Metodo di prova
1	M	$E < 65$	ponderale
2	M	$65 \leq E < 80$	ponderale
3	M	$80 \leq E < 90$	ponderale
4	M	$90 \leq E$	ponderale
5	A	$40 \leq E < 60$	atmosferico
6	A	$60 \leq E < 80$	atmosferico
7	A	$80 \leq E < 90$	atmosferico
8	A	$90 \leq E < 95$	atmosferico
9	A	$95 \leq E$	atmosferico
10	AS	$95 \leq E < 99.9$	fiamma sodio
11	AS	$99.9 \leq E < 99.97$	fiamma sodio
12	AS	$99.97 \leq E < 99.99$	fiamma sodio
13	AS	$99.99 \leq E < 99.999$	fiamma sodio
14	AS	$99.999 \leq E$	fiamma sodio

Tab. 1.3 - UNI 10339: prospetto V

Nel prospetto VI (di cui si riporta esclusivamente la sezione riferita a edifici scolastici nella tabella 1.4) sono indicate le classi di filtri e l'efficienza di filtrazione:

Classificazione degli edifici per categorie	Classe di filtri		Efficienza di filtrazione*
	min	max	
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITA' SCOLASTICHE			
Scuole materne ed elementari	7	9	M+A
Aule in genere	5	6	M+A
Altri locali:			
aule musica e lingue	6	7	M+A
laboratori	6	7	M+A

Tab. 1.4 - UNI 10339: prospetto VI (estratto)

Infine, nel prospetto VIII in appendice A della norma (riportato in tabella 1.5) sono riportati gli indici di affollamento convenzionali (n_s) validi ai fini progettuali in assenza di riferimenti certi, classificati in base alla destinazione d'uso dell'edificio. Il parametro è espresso in numero di persone per metro quadrato di superficie calpestabile.

Classificazione degli edifici per categorie	n_s
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITA' SCOLASTICHE	
Asili nido e scuole materne	0,40
Aule scuole elementari, medie inferiori e superiori	0,45
Aule universitarie	0,60
Altri locali:	
Aule musica e lingue	0,50
Laboratori	0,30
Sale insegnanti	0,30

Tab. 1.5 UNI 10339: prospetto VIII (estratto)

Per completezza si cita un progetto di norma datato 2014 la cui stesura fa capo al C.T.I. per l'aggiornamento della UNI 10339. La pubblicazione prevede una trattazione più completa in materia di impianti aeraulici e definisce per sommi capi i seguenti elementi:

- Una classificazione degli impianti aeraulici
- Classificazione della qualità e delle caratteristiche dell'aria indoor, con riferimento agli standard del benessere termo-igrometrico
- Metodo prescrittivo e prestazionale per il conseguimento del benessere termoigrometrico
- Metodo prescrittivo e prestazionale per il conseguimento della qualità dell'aria interna
- Prescrizioni in merito all'impiego di sistemi e componenti aeraulici
- Tecnologie energeticamente efficienti per gli impianti aeraulici
- Procedure relative alla richiesta dell'offerta, all'offerta e alla fornitura degli impianti

1.4.2 Aspetti energetici

A livello nazionale il principale e più recente riferimento legislativo per il contenimento dei consumi energetici è il D.M. 26/06/2015 "Metodologie e requisiti", in applicazione della direttiva europea 2010/31/UE. Il Decreto richiama le normative di calcolo UNI TS 11300 nelle diverse parti 1, 2, 3 e 4, delle quali la parte seconda riguarda il calcolo dei rendimenti degli impianti ivi inclusi quelli di ventilazione.

La norma **UNI TS 11300-1:2014** "Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale" fornisce il metodo di calcolo per determinare le prestazioni energetiche dell'edificio, ivi incluso il fabbisogno di energia per la ventilazione meccanica.

La norma distingue un diverso approccio di calcolo a seconda del tipo di valutazione e di calcolo, come indicato nella tabella 1.6.

Modalità di valutazione		Dati di ingresso			Scopo ed applicazione	
		Uso	Clima	Edificio	Scopo	Edificio
A1	Di progetto (design rating)	Standard	Standard	Di progetto	Verifiche di legge/certificazione energetica	Nuovo, ristrutturazione o compravendita
A2	Standard (asset rating)	Standard	Standard	Reale		
A3	Adattata all'utenza (tailored rating)	In funzione dello scopo	In funzione dello scopo	Reale	Diagnosi energetica	Esistente

Tab. 1.6 Valutazione edificio (fonte: PROGETTO 2000, 30/06/2017)

Nella valutazione A1 e nella valutazione A2 si distingue tra:

- calcolo della prestazione termica del fabbricato: riferimento alla aerazione naturale
- calcolo della prestazione energetica dell'edificio: riferimento alla ventilazione effettiva e dell'impianto di ventilazione meccanica (se presente)

La portata di aria per la ventilazione è da calcolare in base alla norma 10339:1995 e in base al valore ricavato si distinguono i metodi e le tipologie di impianto per la ventilazione, come indicato in sintesi nel prospetto 8 della norma riportato nella tabella 1.7.

Tipo di ventilazione		Caratteristiche dell'impianto di ventilazione		Utenza		
				Standard		Reale
				Ventilazione di riferimento ^{a)}	Ventilazione effettiva ^{b)}	
Climatizzazione invernale + Ventilazione naturale		Nessun impianto		Punto 12.2	Punto 12.3.1	Punto 12.5
Ventilazione meccanica	Ventilazione meccanica o ibrida ^{c)}	Estrazione centralizzata a singolo condotto			Punto 12.3.2 (ventilazione meccanica) Punto 12.3.3 (ventilazione ibrida)	
		Immissione centralizzata a singolo condotto				
		Immissione ed estrazione bilanciata a doppio condotto				
	Ventilazione meccanica attraverso l'impianto di climatizzazione ^{d)}	Aria primaria in impianto di climatizzazione misto "aria/acqua"	Sola immissione		Punto 12.3.4	
			Immissione ed estrazione			
		Ventilazione attraverso l'impianto di climatizzazione a "tutta aria"				

a) Condizione per il calcolo della prestazione termica del fabbricato (si considera la sola ventilazione naturale).

b) Condizione per il calcolo della prestazione energetica dell'edificio (si considera l'eventuale presenza dell'impianto di ventilazione meccanica).

c) Ventilazione meccanica indipendente.

d) Nella ventilazione meccanica mediante l'impianto di climatizzazione con impianto misto "aria/acqua" il circuito aria primaria è considerato parte dell'impianto di climatizzazione e l'energia per il preriscaldamento dell'aria è fornita dall'unico sottosistema di generazione.

Tab. 1.7 - Norma UNI TS 11300-1, prospetto 8

Nel corso della trattazione saranno presi in considerazione i casi di ventilazione meccanica, e quindi il calcolo di ventilazione effettiva (rif. cap. 12.3 della norma). Ai fini del calcolo la norma prende in considerazione gli elementi descritti in tabella 1.8.

Tipologia	Rif. Norma UNI TS 11300-1	Descrizione parametri
Solo ventilazione meccanica	Par. 12.3.2	Incidenza del contributo della portata aggiuntiva per effetto del vento calcolata nel periodo di funzionamento della ventilazione meccanica. Intervengono fattori quali l'esposizione al vento, il volume dell'involucro, il tasso di ricambio d'aria dovuto alla differenza di pressione (50 Pa) tra interno ed esterno Portata nominale di progetto calcolata per i singoli locali nei tra casi di: • sola estrazione • sola immissione • flusso bilanciato (si tiene conto del valore massimo di portata tra estrazione e immissione) Fattore di efficienza nella regolazione dell'impianto, inteso come coefficiente di riduzione applicato alla portata nominale in funzione della precisione del sistema di controllo del tasso di occupazione dei locali. Intervallo di tempo di funzionamento della ventilazione meccanica calcolato come cumulata delle ore giornaliere di utilizzo dei locali in base al fattore di occupazione (destinazione d'uso dei locali) Fattore di correzione per la temperatura del flusso d'aria, con particolare attenzione ai flussi d'aria in ingresso, considerando la presenza o meno di recuperatori di calore e le caratteristiche di efficienza energetica degli stessi.
Ventilazione ibrida	Par. 12.3.3	Analoghe valutazioni rispetto al caso degli impianti di sola ventilazione meccanica di cui al punto precedente Calcolo della ventilazione naturale nel periodo di spegnimento della ventilazione meccanica (ed es. apertura finestre)
Ventilazione assicurata dall'impianto di climatizzazione	Par. 12.3.4	Il calcolo si esegue solamente per i periodi in cui la ventilazione è in funzione al di fuori dei periodi di accensione dell'impianto di climatizzazione Analoghe considerazioni di cui al punto 12.3.2

Tab. 1.8 - Norma UNI TS 11300-1, parametri per ventilazione

Nell'appendice F della norma (parte 1) si trovano invece i riferimenti per il calcolo dell'efficienza nello scambio termico in presenza di sistemi di recupero termico (scambiatori di calore a flusso incrociato)

Per il calcolo del fabbisogno di energia primaria necessaria alla ventilazione si fa richiamo invece all'appendice C della norma UNI TS 11330-2, includendo il calcolo per le batterie di riscaldamento e per i fabbisogni di umidificazione. Il fabbisogno energetico destinato al trattamento dell'aria per la climatizzazione estiva è invece calcolato a parte secondo la UNI TS 11300-3.

La norma distingue diversi casi, la cui sintesi è indicata nella tabella 1.9.

Tipologia	Rif. Norma UNI TS 11300-2	Descrizione parametri di calcolo
Calcolo energia per la ventilazione meccanica	C.2	Energia primaria dovuto al fabbisogno di energia per la movimentazione dell'aria, utilizzando il fattore di conversione da energia elettrica a energia primaria (f_p) Energia elettrica per ventilazione tenendo conto del fattore di carico (FC) per ciascuna zona, in base all'efficienza di regolazione dell'impianto e della potenza elettrica nominale dei ventilatori Portata d'aria nominale corretta, inteso che si tiene conto anche dell'effetto delle perdite di massa delle condotte, elemento che incide sul calcolo della potenza elettrica dei ventilatori. Le perdite di esfiltrazione vengono determinate in base a calcolo tabellare secondo quanto previsto dalla norma in funzione della tipologia della condotta e della pressione media nominale di esercizio della rete di canali d'aria.
Calcolo energia per riscaldamento	C.3.1	Il fabbisogno di energia per riscaldamento si calcola in base alla UNI TS 11300-1 sul bilancio termico del fabbricato, comprensivo dell'apporto della ventilazione. Le perdite dovute al sistema aeraulico e al sistema idronico dipendono dalla tipologia di impianto: Il metodo di calcolo prevede la distinzione tra : • impianto a tutt'aria: il fabbisogno è attribuito solamente all'impianto aeraulico e ai suoi sottosistemi • impianto misto (aria primaria e circuito idronico): Il fabbisogno di energia utile effettivo è attribuito all'impianto idronico mentre all'impianto di ventilazione è attribuito esclusivamente l'apporto energetico per generare il salto termico sul flusso d'aria fino alla temperatura di immissione. Le perdite del sistema aeraulico sotto il profilo energetico vengono calcolate esclusivamente per i sottosistemi di distribuzione e generazione.

		Calcolo del fabbisogno termico della batteria per riscaldamento dell'aria. Le batterie possono essere alimentate ad acqua (calcolo attribuito al sottosistema di generazione) oppure elettriche (calcolo con fattore di conversione f_P).
Calcolo del fabbisogno di umidificazione	C.3.2	Calcolo del fabbisogno di energia (sottoforma di calore latente) che tiene conto dell'entalpia relativa alla quantità di vapore d'acqua introdotta negli ambienti e dell'entalpia del vapore endogeno. La norma prevede essenzialmente tre tipologie di trattamento: 1) riscaldamento + umidificazione adiabatica 2) pre-riscaldamento + umidificazione adiabatica + post-riscaldamento 3) riscaldamento + umidificazione con immissione di vapore

Tab. 1.9 - Norma UNI TS 11300-1, parametri per i calcoli

Tra le norme UNI è importante citare la **UNI EN 15251:2008** “Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica. La norma mette in correlazione gli elementi che riguardano la qualità dell'aria e le esigenze relative al fabbisogno energetico, considerando i parametri che influenzano la prestazione energetica dell'edificio, i metodi per la valutazione dell'ambiente interno ottenuta da calcoli o da misurazioni.

La classificazione della qualità dell'aria prevede le categorie indicate in tabella 1.10:

Cat. I	Alto livello di aspettativa; è raccomandata per spazi occupati da persone molto sensibili e fragili (come persone con handicap, ammalati, bambini molto piccoli o anziani) che hanno bisogno di requisiti specifici.
Cat. II	Livello normale di aspettativa; dovrebbe essere utilizzata per le nuove costruzioni o per le ristrutturazioni.
Cat. III	Un accettabile moderato livello di aspettativa; dovrebbe essere usata per gli edifici esistenti.
Cat. IV	Valori al di fuori dei criteri delle precedenti categorie; questa categoria dovrebbe essere accettata solo per una limitata parte dell'anno.

Tab. 1.10 – UNI EN 15251: categorie qualità dell'aria

Per gli edifici residenziali la norma definisce i parametri e le fonti da cui dipende la qualità dell'aria, quali ad esempio il numero di occupanti, il periodo di occupazione, il tipo di attività svolta, le sostanze rilasciate dai materiali costituenti gli arredi, i tessuti, i prodotti per la pulizia. Si pone molta attenzione alla presenza di umidità che, oltre a influire sulla salubrità dell'aria, può provocare danni all'edificio dovuti alla formazione di condensa e di muffe, con aggravio dei costi energetici.

Sul piano della progettazione la norma prevede una ventilazione costante durante il periodo di occupazione, mentre è suggerita una ventilazione ridotta rispetto al valore nominale di progetto per i periodi di assenza di persone, con una attenzione al risparmio energetico.

Nei casi di ventilazione naturale, ai fini del calcolo energetico si considerano i coefficienti tabellari per il ricambio d'aria.

Per il settore terziario la norma prevede il calcolo della portata totale di ventilazione in base a due contributi: la presenza di persone con relativo indice di ricambio espresso in litri/secondo per persona e le emissioni di inquinanti *indoor* nell'edificio il cui coefficiente è riferito all'area del volume trattato ed è espresso in litri/secondo per metro quadrato, come indicato nella formula 1.1.

$$q_{tot} [L/s] = n[pers.] \cdot q_b [L/s \cdot pers.] + A[m^2] \cdot q_B [L/s \cdot m^2] \quad (1.1)$$

Dove:

q_{tot} : portata di ventilazione totale in ambiente

n : numero di persone nell'ambiente (dato definito in sede progettuale)

q_b : portata di ventilazione per persona

A : area dell'ambiente trattato

Q_B : portata di ventilazione relativa alle emissioni *indoor*

1.4.3 Controllo e regolazione

In materia di controllo e regolazione si può trovare un riferimento piuttosto recente nella norma EN 15232 che stabilisce l'impatto della building automation sul rendimento energetico degli edifici ed è valida sia per gli edifici esistenti che per quelli in via di progettazione o ristrutturazione. La norma definisce:

- una lista strutturata di controllo, funzioni di building automation e gestione tecnica degli edifici con un impatto sul rendimento energetico;
- un metodo per la definizione dei requisiti minimi da implementare in edifici di diversa complessità;
- metodi per la definizione dell'impatto delle funzioni di automazione su un dato edificio, consentendo pertanto di valutarne l'impatto mediante calcolo di ratings ed indicatori secondo la prEN-15203 e la prEN-15217;
- metodo semplificato per dare una prima stima dell'impatto dell'automazione su un dato tipo di edificio.

Si assumono le seguenti definizioni:

1) Building automation and control (BAC): prodotti, software e servizi di ingegneria per controlli automatici, monitoraggio e ottimizzazione, intervento umano e gestione per raggiungere un funzionamento energeticamente efficiente, economico e sicuro delle apparecchiature a servizio dell'edificio.

2) Building automation and control system (BACS): sistema comprensivo di tutti i prodotti, i software e i servizi di ingegneria per controlli automatici, monitoraggio e ottimizzazione, intervento umano e gestione per raggiungere un funzionamento energeticamente efficiente, economico e sicuro delle apparecchiature a servizio dell'edificio.

Vengono definite quattro classi di efficienza energetica Building Automation and Control (BAC A, B, C, D) per la valutazione delle prestazioni dell'automazione. Sono valide sia per gli edifici residenziali che per quelli non residenziali:

- **D:** BACS a bassa efficienza energetica. I vecchi sistemi andrebbero rivisti ed i nuovi non andrebbero progettati con questi sistemi;
- **C:** BACS base o standard;
- **B:** sistemi di BACS e BMS (Building Management System) avanzati;
- **A:** sistemi di BACS e BMS ad alta resa energetica.

Nella Tabella 5 della norma, per ogni tipologia di impianto e per ogni modalità di controllo o automatismo ad esso collegato, viene attribuita una classe (A, B, C e D).

1.4.4 Regolamenti e norme locali sull'edilizia

In questa sede non è possibile effettuare una analisi sufficientemente articolata e allo stesso tempo sintetica di tutte le norme e leggi in ambito edilizio e urbanistico che richiamano il tema della ventilazione meccanica controllata. Tuttavia è opportuno tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- La legislazione in ambito igienico-sanitario (cui l'aerazione dei locali fa capo) è generalmente demandata alle Amministrazioni locali che predispongono propri atti normativi.
- I Comuni dispongono di un Regolamento Edilizio e di un Regolamento di Igiene che descrivono le caratteristiche e le condizioni necessarie al rilascio dei permessi relativi all'agibilità (ex abitabilità) dei locali ad uso residenziale o assimilato e dei locali destinati ad attività produttive nelle varie tipologie identificate dalla Legge.
- Frequentemente nei regolamenti citati al punto precedente il requisito di aerazione dei locali è inteso come rapporto aero-illuminante e si riferisce pertanto alla ventilazione naturale, indicando, nei casi consentiti dalla Legge, la possibilità di ricorrere alla ventilazione forzata: in questi casi viene richiamata la già citata norma UNI 10339:1995.
- Nei regolamenti specifici riguardanti le attività produttive, si introduce il concetto di impianto di ventilazione forzata come strumento di adeguamento alle condizioni igienico-sanitarie in sostituzione o in integrazione (o compensazione) rispetto alla superficie aero-illuminante carente. (cfr. Linee guida *“Valutazione dei progetti edili per i locali di lavoro da adibire all'esercizio di attività produttive”*, A.S.L. TO1)
- La regolamentazione sulla ventilazione e aerazione si trasferisce sul piano sanitario, pertanto i principali documenti di riferimento sono da ricercare presso A.S.L.

Per quanto riguarda le attività produttive, con riferimento al documento ALLEGATO B Linee guida per le notifiche ed i pareri preventivi ex art. 48 L.R. 56/77 e DPR 303/56 (Regione Piemonte, A.S.L. 5), è richiesta la ventilazione dei locali di lavoro mediante superfici apribili con le modalità previste dai Regolamenti comunali o regionali di igiene edilizia. Inoltre, citando la parte di norma:

“L'impiego di sistemi meccanici deve garantire livelli prestazionali minimi previsti dai Regolamenti comunali o regionali di igiene edilizia e/o rispondere ai requisiti delle norme di buona tecnica.

L'espressione "anche ottenuta con impianti di aerazione" non va infatti intesa come l'avvallo di sistemi di aerazione meccanica in sostituzione della aerazione naturale, bensì come possibilità di integrazione dell'aerazione naturale, qualora non sufficiente per raggiungere il requisito minimo richiesto. (norma UNI 10339)"

1.4.5 Edilizia scolastica: D.M. 18/12/1975

Con riguardo specifico agli edifici a destinazione d'uso scolastico, il decreto di riferimento per gli aspetti igienico sanitari e quindi anche per la ventilazione e aerazione dei locali è il D.M. 18/12/1975: **Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica**

Le norme tecniche citate dal decreto indicano in particolare al punto **5.0. Generalità:**

"Ogni edificio scolastico nel suo complesso ed in ogni suo spazio o locale deve essere tale da offrire a coloro che l'occupano condizioni di abitabilità soddisfacenti per tutto il periodo di durata e di uso, malgrado gli agenti esterni normali; queste condizioni di abitabilità debbono garantire, inoltre, l'espletamento di alcune funzioni in caso di agenti esterni anormali."

Il decreto indica esplicitamente la necessità di garantire uno standard di qualità considerando il rapporto con l'ambiente esterno richiamando, pur implicitamente in queste righe, anche il tema della ventilazione e il ricambio dell'aria.

Altro passaggio di riferimento nel decreto è il seguente:

"5.3.1. I fatti o i fenomeni presi in considerazione che influiscono sull'abitabilità e confortabilità dell'ambiente, devono rispondere ai requisiti che riguardano:

- i) l'equilibrio e la conservazione dei fattori fisici dai quali dipende il benessere termoigrometrico;*
- ii) la conservazione della purezza chimica e microbiologica dell'aria."*

La purezza dell'aria rappresenta un elemento per il quale la ventilazione è determinante in termini di portate di aria e di filtrazione. Il decreto fornisce poi i valori quantitativi per le caratteristiche termoigrometriche dell'aria

In termini quantitativi il Decreto fornisce le indicazioni per la temperatura e il tasso di umidità di riferimento per la progettazione e per la gestione degli impianti.

5.3.11. [...] Temperatura ed umidità relativa dell'aria degli ambienti - La temperatura degli ambienti adibiti ad usi scolastici dovrà essere assicurata, in condizioni invernali, da un adatto impianto di riscaldamento capace di assicurare in tutti gli ambienti, quando all'esterno si verificano le condizioni invernali di progetto, le seguenti condizioni interne:

temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$

salvo non sia diversamente prescritto per locali ad uso speciale.

È consigliabile che vengano assicurati adatti valori della umidità relativa negli ambienti interni adibiti ad attività didattiche e collettive nel periodo invernale, mediante un trattamento di umidificazione dell'aria esterna effettuato dall'impianto di ventilazione idoneo a realizzare un'umidità relativa dell'aria ambiente del 45-55 per cento e a mantenere negli ambienti $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Per la purezza dell'aria vengono forniti i valori di ricambio d'aria:

5.3.12. Purezza dell'aria - Dovrà essere assicurata l'introduzione delle seguenti portate d'aria esterna, mediante opportuni sistemi:

Tipologia ambiente	Tipologia di scuola	Coefficiente di ricambio
<i>ambienti adibiti ad attività didattica collettiva o attività di gruppo</i>	<i>per scuole materne ed elementari</i>	<i>2,5</i>
	<i>per scuole medie</i>	<i>3,5</i>
	<i>scuole secondarie di secondo grado</i>	<i>5,0</i>
<i>altri ambienti di passaggio, uffici</i>	<i>-</i>	<i>1,5</i>
<i>servizi igienici, palestre, refettori</i>	<i>-</i>	<i>2,5</i>

Tab. 1.11 – D.M. 18/12/1975 – Portate d'aria per tipologia di locale

Il decreto fornisce al punto 5.5 – “Condizioni d'uso” anche le indicazioni per la manutenzione dell'impianto, richiamando il concetto di semplicità della gestione e della manovrabilità dei sistemi oltre alla necessità che la ditta installatrice/costruttrice fornisca all'Ente una sorta di manuale di uso e manutenzione degli impianti:

Le condizioni di abitabilità debbono essere raggiunte e conservate, compatibilmente con le esigenze da assolvere, con manovre semplici per il funzionamento di apparecchi, per la apertura o chiusura di finestre, per l'inclusione o l'esclusione di impianti e di sistemi di ventilazione ecc.

All'atto della consegna dell'edificio l'ente che ha provveduto alla costruzione dovrà fornire alla scuola una particolareggiata descrizione sulla gestione degli impianti, sui livelli di agibilità, sul tipo e complessità delle manovre e sull'uso dei mezzi elementari o complessi, necessari a consentire:

a) il raggiungimento e la conservazione delle condizioni di agibilità di cui alle presenti norme;

b) il funzionamento di quelle parti tecniche, o tecnologiche, destinate ad assicurare un perfetto svolgimento delle operazioni didattiche; dovranno essere consegnati in duplice copia i disegni e gli schemi della effettiva realizzazione di tutti gli impianti tecnologici: riscaldamento, idraulico, elettrico ecc.

1.4.6 Altri riferimenti a norme tecniche

Con la sola finalità di fornire un quadro più ampio e completo delle norme di riferimento in tema di impianti aeraulici e in particolare di ventilazione si cita l'elenco delle pubblicazioni UNI così come riportato nella bozza di revisione (2014) della già citata norma UNI 10339 .

UNI 8199	Acustica - Collaudo acustico degli impianti di climatizzazione e ventilazione - Linee guida contrattuali e modalità di misurazione
UNI 9494-2	Sistemi per il controllo di fumo e calore - Parte 2: Progettazione e installazione dei Sistemi di Evacuazione Forzata di Fumo e Calore (SEFFC).
UNI EN 308	Scambiatori di calore – Procedimenti di prova per stabilire le prestazioni dei recuperatori di calore aria/aria e aria/gas
UNI EN 779	Filtri di aria antipolvere per ventilazione generale – Determinazione della prestazione di fil-trazione
UNI EN 1366-2	Prove di resistenza al fuoco per impianti di fornitura servizi - Serrande tagliafuoco
UNI EN 1505	Ventilazione negli edifici - Condotte metalliche e raccordi a sezione rettangolare - Dimensioni.

UNI EN 1506	Ventilazione degli edifici - Condotte di lamiera metallica e raccordi a sezione circolare – Dimensioni.
UNI EN 1507	Ventilazione degli edifici - Condotte rettangolari di lamiera metallica - Requisiti di resistenza e di tenuta
UNI EN 1751	Ventilazione degli edifici - Dispositivi per la distribuzione dell'aria - Prove aerodinamiche delle serrande e delle valvole
UNI EN 1822	Filtri aria a particelle per alta e altissima efficienza (EPA, HEPA e ULPA)
UNI EN 1886	Ventilazione degli edifici – Unità di trattamento dell'aria – Prestazione meccanica
UNI EN 10143	Lamiere sottili e nastri di acciaio con rivestimento applicato per immersione a caldo in continuo - Tolleranze sulla dimensione e sulla forma.
UNI EN 11254	Filtri per aria elettrostatici attivi per la ventilazione generale – Determinazione della prestazione di filtrazione
UNI EN 12097	Ventilazione degli edifici - Rete delle condotte - Requisiti relativi ai componenti atti a facilitare la manutenzione delle reti delle condotte
UNI EN 12237	Ventilazione degli edifici - Reti delle condotte - Resistenza e tenuta delle condotte circolari di lamiera metallica.
UNI EN 12238	Ventilazione degli edifici - Bocchette - Prove aerodinamiche e classificazione per applicazioni a flusso miscelato
UNI EN 12239	Ventilazione degli edifici - Bocchette - Prove aerodinamiche e classificazione per applicazioni di dislocamento
UNI EN 12831	Impianti di riscaldamento negli edifici - Metodo di calcolo del carico termico di progetto
UNI EN 13053	Ventilazione degli edifici - Unità di trattamento dell'aria - Classificazioni e prestazioni per le unità, i componenti e le sezioni
UNI EN 13141-2	Ventilazione degli edifici - Verifica della prestazione di componenti/ prodotti per la ventilazione degli alloggi - Parte 2: Bocchette per l'estrazione e l'immissione dell'aria
UNI EN 13141-7	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/ prodotti per la ventilazione degli alloggi - Parte 7: Verifica delle prestazioni di unità di ventilazione meccanica di immissione ed estrazione (compreso il recupero di calore) di impianti di ventilazione meccanica destinati ad abitazioni unifamiliari
UNI EN 13141-8	Ventilazione degli edifici - Verifica della prestazione di componenti/ prodotti per la ventilazione degli alloggi - Parte 8: Verifica delle prestazioni di unità di ventilazione meccanica di immissione ed estrazione (compreso il recupero di calore) di impianti di ventilazione meccanica destinati ad ambienti singoli
UNI EN 13142	Ventilazione degli edifici - Componenti/ prodotti per la ventilazione residenziale - Caratteristiche di prestazione richieste e facoltative
UNI EN 13403	Ventilazione degli edifici. Condotte non metalliche – Rete delle condotte realizzata con pannelli di materiale isolante
UNI EN 13501-3	Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 3: Classificazione in base ai risultati delle prove di resistenza al fuoco dei prodotti e degli elementi impiegati in impianti di fornitura servizi: condotte e serrande resistenti al fuoco
UNI EN 13779	Ventilazione degli edifici non residenziali - Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione
UNI EN 15251	Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica
UNI EN 15650	Ventilazione degli edifici - Serrande tagliafuoco
UNI EN ISO 5135	Acustica - Determinazione dei livelli di potenza sonora del rumore delle bocchette d'aria, unità terminali, serrande di taratura e valvole mediante misurazione in camera riverberante

UNI EN ISO 7730	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 14644-4 Camere bianche ed ambientali associati controllati – parte 4: progettazione, costruzione e avviamento.
------------------------	---

2 ELEMENTI DI BASE PER LA PROGETTAZIONE

Nel presente capitolo si espongono i riferimenti principali di cui tenere conto per definire gli elementi di base della progettazione di un impianto di ventilazione. Gli aspetti principali riguardano in primo luogo le condizioni di benessere termo-fisico globale e locale percepito dalla persona all'interno di un ambiente, le condizioni di salubrità dell'aria, per poi successivamente analizzare i requisiti degli impianti in funzione della tipologia e delle caratteristiche dell'involucro edilizio. Pur trattandosi di elementi validi per la progettazione in generale, considerando la finalità dell'elaborato, si porrà maggiore attenzione al caso di impianti di ventilazione da installare come implementazione in edifici esistenti con impianto termico per climatizzazione invernale esistente.

2.1 Il benessere termoigrometrico

L'impianto di climatizzazione e di ventilazione in un edificio ha la funzione di garantire negli ambienti cui esso è asservito le caratteristiche di temperatura e umidità richieste secondo i parametri previsti dalla Legislazione e dalle Normative in materia, tenendo conto anche degli elementi che possono incidere sulla sensazione del benessere delle persone che occupano i volumi climatizzati. Oltre a quelli già citati vi sono quindi altri parametri altrettanto importanti che debbono essere tenuti in considerazione, quali ad esempio la velocità dell'aria e lo squilibrio termico tra superfici irraggianti. Tutti questi elementi concorrono al mantenimento del benessere termo-igrometrico cioè il livello di soddisfazione che un soggetto percepisce all'interno di un ambiente dal punto di vista della temperatura e del grado di umidità.

Uno dei metodi più efficaci per lo studio del benessere termo-igrometrico riconosciuto dalla norma UNI EN ISO 7730 è l'indice PMV (Predicted Mean Vote) studiato e suggerito da Fanger, basato su attività sperimentale in camera climatica con campioni elevati di soggetti. Altro metodo riconosciuto dalla norma ASHRAE Std 55-1992 è invece l'adozione dell'indice ET* (New Effective Temperature), che peraltro si basa sugli stessi fattori.

La percezione del benessere per il corpo umano è determinata sulla base di una serie di fattori che caratterizzano l'equilibrio termico del corpo, generalmente variabili nel tempo e soggettivi.

I parametri ambientali di riferimento sono:

- Temperatura dell'aria
- Temperatura media radiante delle superfici che si "affacciano" al soggetto
- Velocità dell'aria
- Umidità relativa dell'aria

I parametri relativi all'individuo, che incidono nella valutazione della percezione del benessere sono:

- Caratteristiche dell'abbigliamento (maggiore o minore resistenza termica)
- Attività fisica svolta (metabolismo)

In termini quantitativi e analitici, per tenere conto dei parametri sopra indicati, si adotta l'equazione di bilancio di energia sul corpo umano, definita nell'equazione (2.1)

$$S = M - W - E_{VE} - C_{VE} - E_{d,sk} - E_{w,sk} - C - R - K \quad (2.1)$$

dove i singoli termini sono:

- | | |
|---|---|
| S | variazione dell'energia interna del corpo (o accumulo dell'energia) nell'unità di tempo [W] |
| M | Potenza metabolica (metabolismo energetico) [W], è funzione unicamente dell'attività svolta ed è il risultato della trasformazione di energia chimica in energie termica, riferita all'unità di tempo. Per le finalità del presente elaborato si danno come riferimento i seguenti valori metabolici: |

- Attività leggera sedentaria (ufficio, scuole): 70 W/m²

- Attività leggera in piedi: 93 W/m²

W	Potenza meccanica ceduta all'ambiente esterno resa sottoforma di attività fisica [W]
E _{VE}	Potenza termica dispersa nella respirazione come evaporazione (calore latente) [W]
C _{VE}	Potenza termica dispersa nella respirazione per convezione (calore sensibile) [W] La potenza termica scambiata attraverso la respirazione è calcolata in funzione della temperatura dell'aria, del grado igrometrico dell'aria, dell'attività svolta dall'individuo
E _{d,sk}	Potenza termica dispersa attraverso la pelle per effetto della diffusione [W], calcolata in funzione della temperatura della pelle, della temperatura dell'aria, del grado igrometrico dell'aria
E _{w,sk}	Potenza termica dispersa attraverso la pelle per effetto della sudorazione (calore latente) [W], calcolata in funzione della temperatura della pelle, della temperatura dell'aria, del grado igrometrico dell'aria, della velocità relativa tra l'individuo e l'aria, della permeabilità dell'abbigliamento e della quota parte della superficie corporea ricoperta dal sudore
C	Potenza termica dispersa per convezione attraverso la superficie della pelle nuda esposta, pari a circa il 20 – 30% della superficie totale [W], calcolata in funzione della temperatura dell'aria, della temperatura della superficie esterna del corpo (considerando l'abbigliamento), della velocità relativa tra l'individuo e l'aria, della percentuale di superficie corporea coperta da vestiti
R	Potenza termica dispersa per irraggiamento attraverso la superficie della pelle nuda esposta, pari a circa il 20 – 30% della superficie totale [W], dipende dalla temperatura della superficie del corpo esposta all'esterno (considerando l'eventuale presenza di abbigliamento), dalla temperatura dell'ambiente media radiante (tiene conto delle temperature superficiali delle superfici affacciate al corpo e il relativo fattore di vista)
K	Potenza termica dispersa per conduzione, considerando quindi anche l'effetto generato dalla resistenza termica dell'abbigliamento [W]

A partire dall'equazione (2.1), una condizione necessaria per il raggiungimento del comfort termico è il raggiungimento di equilibrio ($S=0$).

Per quantificare il bilancio descritto ai punti precedenti in relazione alla percezione di comfort da parte degli utenti, sono state introdotte due grandezze:

- **PMV** (Predicted Mean Vote): rappresenta il giudizio di una persona rispetto alla sensazione di caldo o freddo, in una scala di sette valori da -3 (corrispondente a “molto freddo”) a +3 (corrispondente a “molto caldo”)
- **PPD** (Predicted Percentage of Dissatisfied): rappresenta la percentuale prevedibile di insoddisfatti, cioè individui che percepiscono disagio termico

Le due grandezze sono correlate come indicato nel grafico in figura 2.1: secondo Fanger anche in corrispondenza di $PMV = 0$, cioè di condizioni di comfort neutre, esiste sempre una percentuale di insoddisfatti pari al 5%

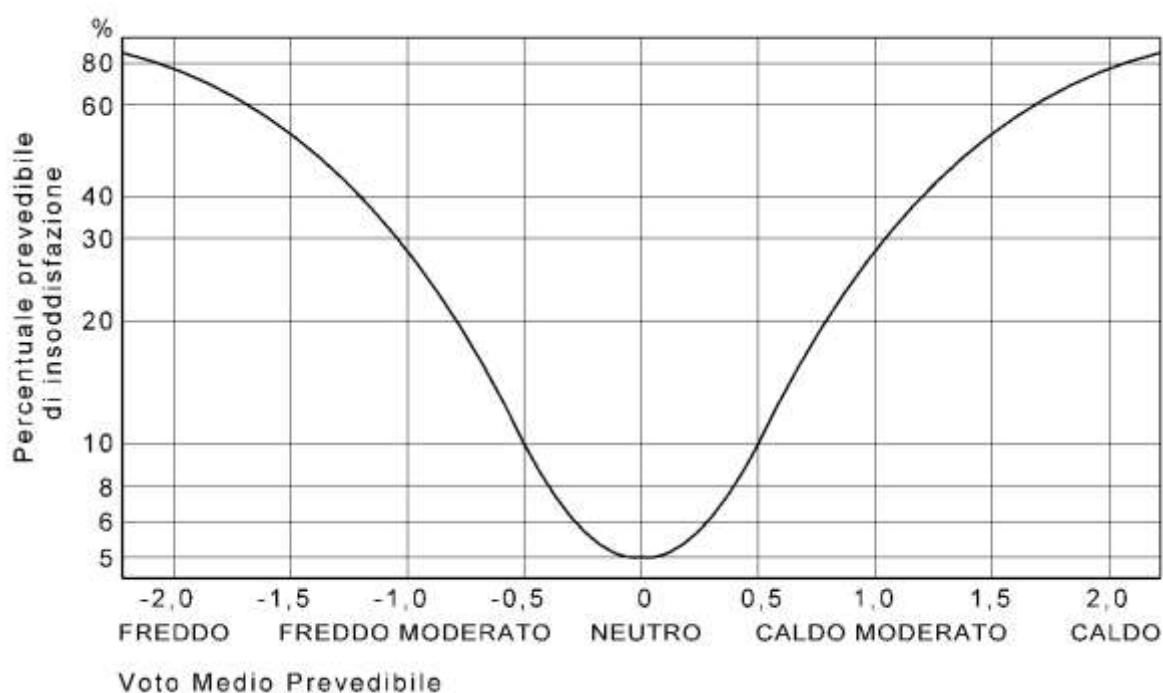


Fig. 2.1 – Correlazione tra indici PMV e PPD

Per la corretta impostazione del progetto occorre tuttavia valutare in modo specifico anche i seguenti aspetti:

- Sensibilità al gradiente verticale di temperatura
- Valore della temperatura del pavimento
- Effetto della velocità d'aria

- Sensibilità a valori asimmetrici della temperatura piana radiante

che definiscono le condizioni di benessere “locali”, ovvero quelle indotte su parti specifiche del corpo umano da anomalie termiche del locale.

2.1.1 Gradiente verticale di temperatura

Il gradiente verticale di temperatura è percepito come disagio fisico quando la temperatura a livello delle caviglie è minore di quella a livello della testa, mentre la situazione opposta non risulta essere altrettanto fastidiosa. Nel grafico in figura 2.2 è riportato l'indice PD (percentuale di individui insoddisfatti) in relazione al ΔT tra testa e caviglie.

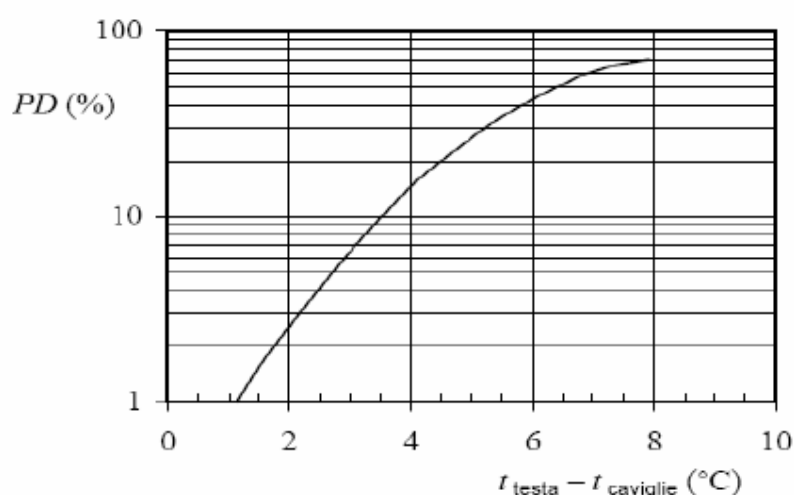


Fig. 2.2 – Indice PD(%) in funzione del ΔT testa-piedi [10]

2.1.2 Temperatura del pavimento

La temperatura del pavimento assume una duplice valenza nel calcolo delle caratteristiche termiche ai fini del comfort ambientale in quanto incide come superficie radiante e come elemento di contatto con i piedi, generando uno scambio per conduzione. La componente radiativa rientra nella valutazione degli effetti della temperatura media radiante mentre l'effetto della conduzione è determinante in particolare per gli ambienti in cui le persone sono a piedi scalzi.

Nel grafico in figura 2.3 si evidenzia la percentuale di individui insoddisfatti (PD) in funzione della temperatura del pavimento nell'ipotesi che siano indossate calzature normali.

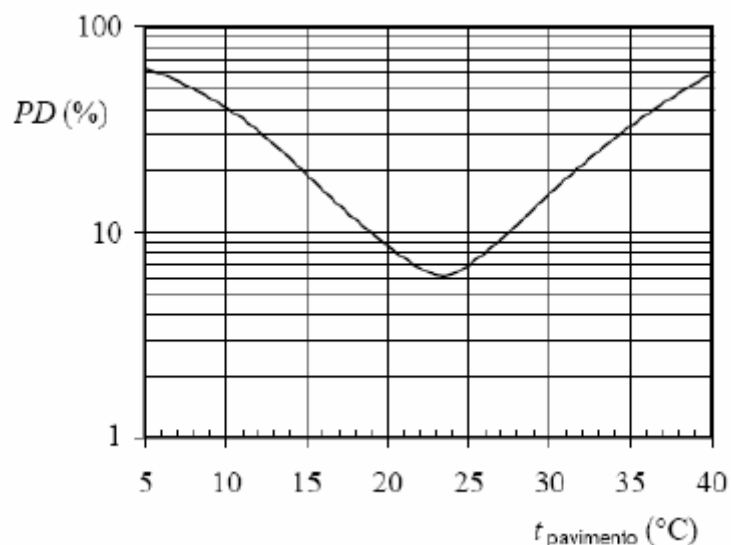


Fig. 2.3 – Indice PD(%) in funzione della temperatura di pavimento [10]

2.1.3 Velocità d'aria

La velocità dell'aria è avvertita come corrente o movimentazione d'aria che crea un raffreddamento sulle parti più esposte del corpo: per gli ambienti interni di tipo moderato si tratta del viso, delle mani e delle braccia.

La velocità dell'aria in un ambiente è caratterizzata da un regime turbolento come indicato nel grafico di figura 2.4, pertanto l'individuo residente all'interno di un locale è generalmente esposto a un andamento del flusso di aria non stazionario.

Per la valutazione delle condizioni di benessere all'interno di un ambiente si considerano le seguenti componenti, diagrammate nella figura 2.5:

- il valore medio della velocità (v_a)
- la temperatura dell'aria (T)
- l'intensità della turbolenza (T_u)

In condizioni di progetto si adotta come riferimento la curva relativa a $T_u=0,40$.

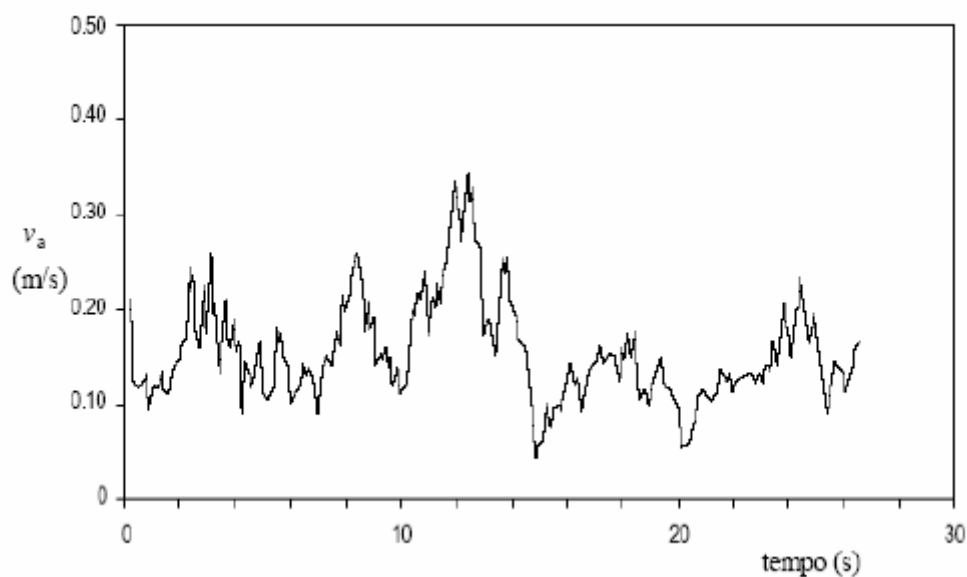


Fig. 2.4 – Esempio di variazioni della velocità istantanea in ambiente chiuso [10]

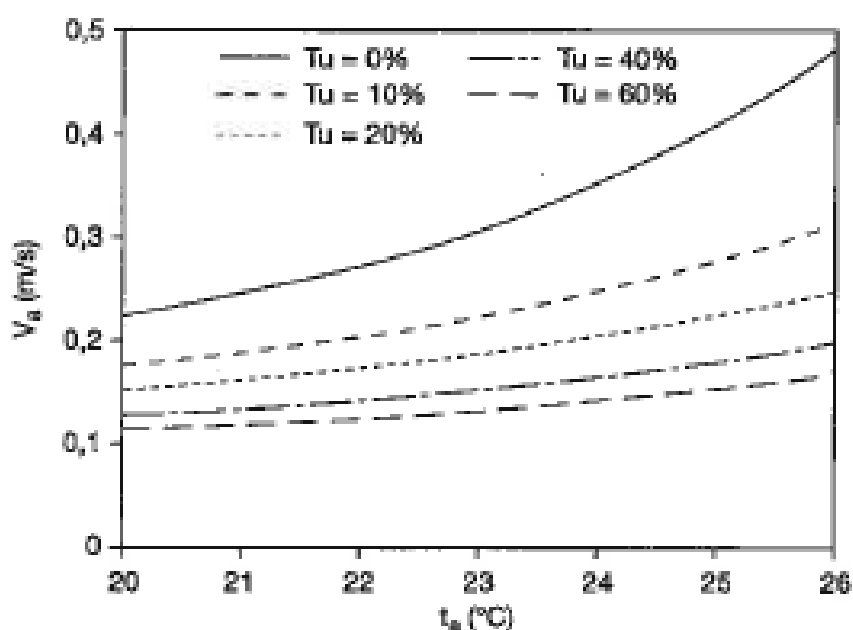


Fig. 2.5 – Valori limite della velocità dell'aria [10]

2.1.4 Valori asimmetrici della temperatura piana radiante

La temperatura piana radiante esprime la temperatura media radiante percepita esclusivamente su un lato del corpo, riferita quindi al semispazio “visto” da una faccia dell'individuo

esposto. Quando la differenza di temperatura radiante tra le due facce dello stesso soggetto supera determinati valori limite, si genera una asimmetria termica che viene percepita come disagio ambientale. Nel grafico in figura 2.6 è indicata la percentuale di individui insoddisfatti in funzione della asimmetria della temperatura radiante in diverse condizioni ambientali.

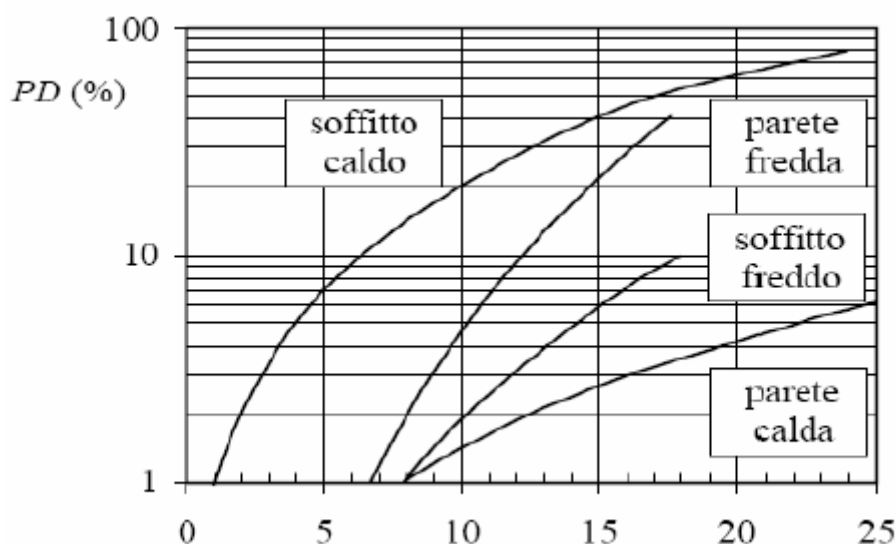


Fig. 2.6 – Valori limite asimmetria temperatura piana radiante [10]

Nel caso specifico degli ambienti destinati ad uso scolastico, considerando l'oggetto particolare di studio della presente relazione, risultano importanti i seguenti aspetti:

- gradiente verticale di temperatura perché per la maggior parte del tempo di residenza all'interno delle classi gli utenti sono seduti, pertanto una differenza di temperatura di oltre 3°C tra le quote di 0,1 m e 1,1 m dal piano pavimento (rif. norma UNI 7730) può determinare disagio
- pavimento freddo perché in modo particolare per le scuole materne (o asili nido) in cui gli utenti indossano generalmente calze o calzature leggere, l'incidenza dello scambio termico a contatto con il pavimento può essere significativa.
- velocità dell'aria perché è fondamentale nella progettazione di impianti di ventilazione meccanica al fine di non arrecare disagio agli utenti. E' una componente significativa anche in casi di ventilazione naturale in presenza di infiltrazioni nell'edificio, correnti d'aria, flussi ascendenti e discendenti
- asimmetria piana radiante che si verifica generalmente nel periodo invernale in presenza di aule in cui la disposizione delle postazioni degli allievi sono vicine a corpi scaldanti

(radiator) aventi una componente radiante non trascurabile. In queste situazioni il disagio avvertito è significativo e difficilmente può essere evitato se non allontanando l'individuo dalla sorgente calda.

2.2 Salubrità dell'aria

Oltre agli aspetti termo-fisici che si riflettono sulla sensazione di benessere termoigrometrico all'interno degli ambienti, è opportuno considerare gli aspetti che determinano la qualità "igienica" dell'aria, in termini di cattivi odori e di presenza di agenti inquinanti. In questo ambito occorre innanzitutto:

- Eliminare, ove possibile, le sorgenti endogene di inquinanti e contenere i processi o attività che producono inquinamento
- Immettere adeguate portate di rinnovo di aria esterna
- Rimuovere per filtrazione le sostanze inquinanti provenienti dall'aria esterna (di rinnovo)
- Rimuovere efficacemente gli inquinanti endogeni

Gli effetti delle sostanze inquinanti presenti nell'aria, se la permanenza all'interno degli ambienti è elevata, possono comportare effetti sulla salute degli occupanti nel medio-lungo periodo o anche permanenti.

Generalmente in uno spazio confinato occupato da individui sono presenti un numero elevato di composti inquinanti dei quali molti si trovano a concentrazioni minime (spesso non facilmente misurabili) e dei quali non si conoscono pienamente gli effetti tossicologici. Alcuni inquinanti possono essere tollerati a basse concentrazioni, mentre le irritazioni e gli odori rappresentano un segnale immediato del peggioramento delle condizioni ambientali.

Gli effetti della qualità dell'aria sulla salute rientrano nella valutazione dei rischi (nelle casistiche previste per Legge) e i limiti di tolleranza sono definiti in base alla massima concentrazione consentita o alla massima dose assimilata dall'organismo.

I più comuni inquinanti presenti nell'aria sono: monossido di carbonio, formaldeide, piombo, diossido di azoto, odori, composti organici volatili, muffe, ozono, particolato, fumo, radon, diossido di

zolfo, prodotti generati da attività domestiche. Gli inquinanti diluiti nell'aria negli ambienti interni sono derivati sia dall'aria esterna, sia per la formazione endogena di sostanze che vengono miscelate all'aria.

Nell'ambito degli edifici scolastici i sistemi di ventilazione dotati di opportuni sistemi di filtrazione assumono un ruolo di estrema importanza. Occorre tenere conto infatti dei seguenti aspetti:

- Il numero di occupanti rispetto al volume degli ambienti (classi) richiede un apporto di ventilazione elevato in termini di metri cubi orari
- La aerazione naturale affidata al buon senso degli occupanti non permette di regolare l'effettiva portata e non consente un ricambio omogeneo in tutti i locali
- La ventilazione meccanica garantisce un corretto apporto di aria di ricambio (condizioni di progetto, di minima occupazione, di massimo carico ...) e può essere ottimizzata mediante controllo affidato a un sistema di regolazione retroattivo (VMC)
- La ventilazione naturale non permette né la riduzione né l'abbattimento di inquinanti
- Con la ventilazione meccanica è possibile adottare sistemi filtranti per rimuovere la quantità e la tipologia maggiore possibile di sostanze inquinanti esterne e grazie alla corretta collocazione delle bocchette si possono rimuovere in maniera efficace gli inquinanti generati internamente
- L'impianto di VMC è progettato ottimizzando l'efficienza di ventilazione mediante l'opportuna collocazione delle bocchette di immissione ed estrazione

2.2.1 Agenti inquinanti esterni

L'inquinamento indotto dall'esterno è determinato, oltre alle cause da ricercare nello stato del clima, da diverse componenti in relazione all'ambito geografico e urbano della localizzazione dell'edificio e da cause di origine naturale.

Gli effetti dell'inquinamento locale indotto dall'esterno sono particolarmente significativi quando l'edificio è collocato nei pressi di sorgenti esterne quali ad esempio siti industriali con sorgenti di effluenti di tipo gassoso, strade con livelli di traffico medio-alti, scarichi di impianti termici.

Altre situazioni di inquinamento outdoor si verificano quando nei pressi delle superfici aeranti dell'edificio si concentrano sorgenti di emissioni inquinanti per periodi limitati. L'esempio paradigmatico per gli edifici destinati ad uso scolastico è la sosta di autoveicoli, di autobus e di scuolabus con motore acceso nei momenti di ingresso e uscita degli studenti: sulla proiezione

verticale dell'edificio affacciata sulle aree di parcheggio, il livello di inquinanti diluiti all'aria esterna assume concentrazioni temporaneamente elevate e in presenza di finestre aperte l'aria di ricambio per ventilazione naturale risulta essere particolarmente inquinata. L'abitudine di chiudere le finestre una volta entrati in aula (soprattutto nel periodo invernale) determina quindi il ristagno di aria inquinata all'interno degli ambienti con conseguenti ricadute sugli occupanti.

Generalmente la purificazione dell'aria esterna di rinnovo in ingresso agli ambienti confinati è di difficile realizzazione e non è efficace in assenza di ventilazione meccanica (ventilazione naturale) e in presenza di sistemi di sola estrazione dell'aria.

I principali agenti inquinanti esterni sono:

- **emissioni da siti industriali:** si tratta in particolare di ossidi di azoto e di zolfo, ozono, piombo, composti organici volatili (COV), fumi contenenti particolati e fibre. Le emissioni di gas dei siti industriali in determinate condizioni possono propagarsi per centinaia di chilometri oppure in condizioni di clima stabili possono ristagnare in aree circoscritte generando problematiche sulla qualità dell'aria. In Italia il principale riferimento normativo in materia è il D.Lgs. 152/2006, che prevede con una serie di decreti integrativi la delega al controllo delle emissioni alle Regioni e alle Provincie con specifiche attività autorizzative a seconda della tipologia e delle entità delle emissioni stesse. Per quanto riguarda l'ozono alcuni studi risalenti ai primi anni '90 hanno dimostrato che la ricombinazione della molecola di ozono in ossigeno è favorita dal passaggio attraverso pareti in calcestruzzo o mattoni in laterizio e dipende dal materiale di costruzione delle linee di distribuzione dell'aria
- **Emissioni da traffico veicolare:** comprendono i seguenti composti: monossido di carbonio, piombo, ossidi di azoto, additivi, incombusti. Questa tipologia di inquinamento è caratteristica delle aree altamente urbanizzate, localizzato in particolare a livello del piano stradale, in prossimità degli accessi a gallerie e/o sottopassi, aree di parcheggio. Il problema della concentrazione degli inquinanti è spesso transitorio con il verificarsi di picchi in determinati orari della giornata: la ventilazione degli edifici in queste fasce orarie comporta l'introduzione di aria ad alto contenuto di inquinanti che, in assenza di opportuni sistemi, difficilmente riescono ad essere smaltiti ed espulsi all'esterno.
- **Emissioni da camini e torri di raffreddamento:** sono determinanti in contesto urbano quando le superfici aero-illuminanti si trovano in prossimità di camini o canne fumarie di impianti termici o in prossimità di torri di raffreddamento di impianti per la climatizzazione. In questo caso particolare, trattandosi di sistemi con produzione di

elevate quantità di vapore d'acqua che viene diluito all'aria, la carente manutenzione e pulizia degli impianti può comportare la formazione del batterio della *legionella pneumophila*. L'impatto sulla salute dovute all'assimilazione del batterio può essere grave e, in casi di persone particolarmente deboli, può condurre alla morte.

- **Inquinanti nel suolo:** sono composti e sostanze (radon, metano e umidità) che possono penetrare all'interno degli edifici dai piani inferiori attraverso le fondazioni e i locali posti al seminterrato, in modo particolare se è presente un sistema di estrazione d'aria forzata che può agire anche indirettamente sui locali suddetti. Il radon è un composto radioattivo presente in natura nel sottosuolo in alcune regioni circoscritte, in funzione della stratificazione geologica, che incide sul rischio di insorgenza di tumori. Il metano è inodore e può trovarsi nel sottosuolo in forma naturale o nelle vicinanze di discariche; oltre a essere dannoso all'organismo è pericoloso se accumulato in ambienti chiusi e confinati a concentrazioni oltre il limite di infiammabilità. L'umidità proveniente dal sottosuolo non rappresenta di fatto un inquinante per le intrinseche qualità chimiche ma può incidere in modo significativo sul carico igrometrico complessivo dell'edificio con conseguenti problematiche alle strutture e agli occupanti.

2.2.2 Agenti inquinanti interni

Le sostanze inquinanti endogene sono generate principalmente dal metabolismo degli occupanti e quindi sono determinate in funzione della destinazione d'uso dell'edificio e dal numero di persone presenti rispetto al volume occupato, ma occorre considerare anche le sostanze rilasciate dai materiali utilizzati nella costruzione dell'edificio, dagli arredi interni e da eventuali macchinari.

In tabella 2.1 sono riportati i valori medi delle emissioni di composti dal corpo umano come prodotto del metabolismo. In tabella 2.2 sono indicati valori medi delle emissioni prodotte all'interno degli ambienti, arredamenti e tendaggi.

Contaminant	Typical Emission, $\mu\text{g/h}$	Contaminant	Typical Emission, $\mu\text{g/h}$
Acetaldehyde	35	Methane	1 710
Acetone	475	Methanol	6
Ammonia	15 600	Methylene chloride	88
Benzene	16	Propane	1.3
2-Butanone (MEK)	9 700	Tetrachloroethane	1.4
Carbon dioxide	32×10^6	Tetrachloroethylene	1
Carbon monoxide	10 000	Toluene	23
Chloroform	3	1,1,1-Trichloroethane	42
Dioxane	0.4	Vinyl chloride monomer	0.4
Hydrogen sulfide	15	Xylene	0.003

Sources: Anthony and Thibodeau (1980); Brugnone et al. (1989); Cohen et al. (1971); Conkle et al. (1975); Gorban et al. (1964); Hunt and Williams (1977); and Nefedov et al. (1972).

Tab. 2.1 – Emissioni da corpo umano

Contaminant	Average Generation Rate, $\mu\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$						
	Caulk	Adhe- sive	Lino- leum	Carpet	Paint	Varnish	Lac- quer
C-10 Alkane	1200						
n-Butanol	7300						760
n-Decane	6800						
Formaldehyde			44	150			
Limonene		190					
Nonane	250						
Toluene	20	750	110	160	150		310
Ethyl benzene	7300						
Trimethyl benzene		120					
Undecane						280	
Xylene	28						310

Contaminant	Average Generation Rate, $\mu\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$						
	GF Insula- tion	GF Duct Liner	GF Duct Board	UF Insula- tion	Particle Board	Under- lay	Printed Ply- wood
Acetone					40		
Benzene					6		
Benzaldehyde					14		
2-Butanone					2.5		
Formaldehyde	7	2	4	340	250	600	300
Hexanal					21		
2-Propanol				6			

GF = glass fiber; UF = ureaformaldehyde foam

Sources: Matthews et al. (1983, 1985), Nelms et al. (1986), and White et al. (1988).

Tab. 2.2 – Emissioni da parti interne dell'edificio

Tra i principali agenti inquinanti interni si possono citare i seguenti:

- **Biossido di carbonio (CO_2):** è generato dal metabolismo delle persone come prodotto di scarto ma può anche essere prodotto dalla combustione in caso di cucine o generatori a combustione in locali non correttamente ventilati. La CO_2 è un gas non tossico e non dannoso se non ad alte concentrazioni.
- **Monossido di carbonio (CO):** si tratta di un gas altamente tossico, inodore e incolore, generato nei processi di combustione incompleta, caratteristici di apparecchi a biomassa utilizzati all'interno di ambienti in carenza di ossigeno o limitata adduzione di aria comburente.
- **Formaldeide (CH_2O):** si presenta come gas incolore e altamente tossico, probabile causa di formazione di tumori, negli ambienti interni si trova come composto chimico utilizzato nella fabbricazione di laminati (fibre di legno) e nelle schiume termo-isolanti. In molti Paesi l'impiego di formaldeide e il conseguente rischio di emissioni sono oggetto di severi controlli.
- **Vapore acqueo (H_2O):** la produzione di vapore d'acqua internamente agli ambienti confinati è dovuta principalmente dalle persone e, in ambito domestico, dalle attività quali ad esempio la preparazione dei cibi, il lavaggio e l'asciugatura del bucato. Essendo un prodotto di combustione si manifesta anche in presenza di cucine a gas o impianti termici (tipo A) in ambienti non correttamente ventilati. Il vapore d'acqua, condensando sulle superfici più fredde dell'involucro, crea problematiche legate alla formazione di muffe e conseguenti danni al fabbricato
- **Odori:** Gli odori sono generati dal metabolismo delle persone ma anche dagli oggetti (arredi, tessuti) presenti all'interno degli ambienti. La percezione di odore genera negli occupanti un'immediata sensazione di disagio e induce spesso al ricorso alla ventilazione. Atteggiamento caratteristico nei confronti degli odori è l'assuefazione da parte degli occupanti un determinato volume (aula ad uso scolastico): generalmente solo un soggetto esterno che entra nell'ambiente avverte la presenza di odore. Trattandosi di un elemento soggettivo il metodo per la misurazione degli odori (Fanger, primi anni '90) prevede l'adozione di unità di misura basate sul giudizio da parte delle persone che si quantifica con due unità di misura: "olf" per l'emissione di odore da parte di un individuo, "decipol" per la percezione di odore. La stima della quantità di odore per la definizione del progetto di impianti rappresenta un problema per definire il corretto dimensionamento delle portate d'aria di rinnovo.

- **Ozono:** l'ozono (oltre alla quota parte proveniente dall'esterno dell'involucro) viene rilasciato da macchine per stampa, fotocopiatori, stampanti laser, soprattutto quando la manutenzione non è eseguita regolarmente e nei modi corretti come previsto dal costruttore.
- **Particolati:** includono polvere, frammenti organici fibre e particelle di fumo, sono generalmente tossici a vari livelli a seconda della tipologia e delle dimensioni
- **Composti organici volatili (COV):** sono generati come rilascio da arredi e tessuti e da prodotti chimici utilizzati all'interno degli ambienti. La varietà di COV è piuttosto elevata e non si conoscono le caratteristiche tossicologiche di tutti i composti rilevati.

Nella trattazione di questo paragrafo sono stati citati composti che possono assumere gradi di tossicità anche in funzione della capacità di assimilazione e di penetrazione nell'apparato respiratorio. E' bene quindi riportare una breve indicazione sulla capacità di assimilazione di particelle da parte dell'individuo medio in relazione alla loro dimensione. In tabella 2.3 sono riportate le principali caratteristiche delle particelle per dimensione e capacità di penetrazione nell'organismo.

Tipologia	Dimensioni (diametro aerodinamico)	Capacità di penetrazione nell'organismo
Particolato grossolano	> 10 µm	Vengono trattenute dalla parte superiore dell'apparato respiratorio
Polveri fini	< 10 µm > 2,5 µm	Penetrazione nel tratto respiratorio superiore (naso, faringe, trachea)
Particolato fine	< 2,5 µm	Penetrazione profonda nei polmoni, trattenute a livello degli alveoli
Polvere respirabile (particolato ultra-fine)	< 1 µm	Penetrazione profonda nei polmoni, fino agli alveoli
Nano polveri di particolato	1 nm (0,001 µm)	Penetrazione fino alle cellule, possibile conseguente mutazione del DNA

Tab. 2.3 – Capacità di penetrazione nell'organismo di composti e polveri

(fonte: Ministero della Salute, 2015)

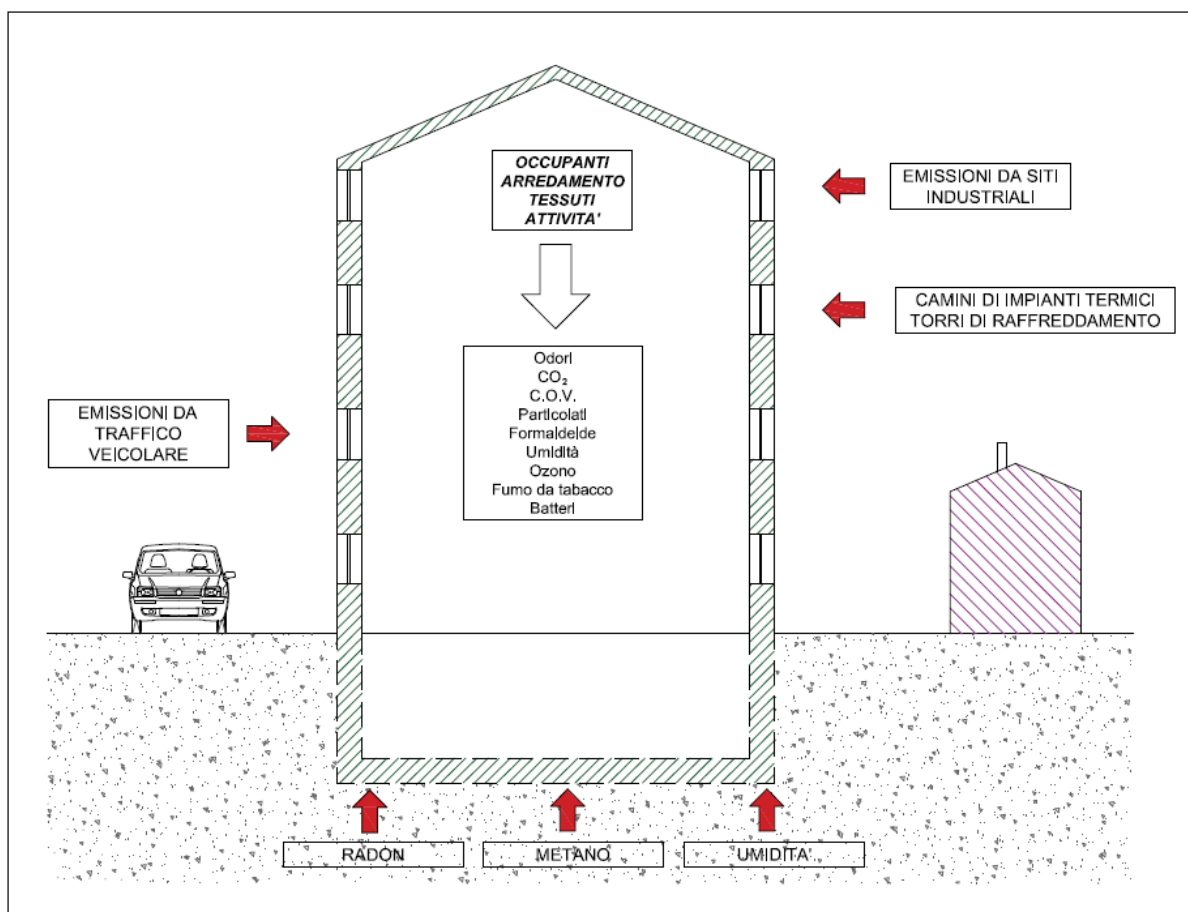


Fig. 2.7 – Schema dei principali agenti inquinanti indoor e outdoor

2.2.3 Azioni per la riduzione degli agenti inquinanti

I metodi per il controllo degli agenti inquinanti negli spazi climatizzati devono consentire la riduzione dei contaminanti all'interno grazie all'immissione e diluizione con aria di rinnovo, e d'altro canto devono tenere in considerazione la qualità dell'aria esterna. Il sistema ottimale prevede quindi il trattamento dell'aria esterna di rinnovo e dell'aria interna.

Negli edifici in cui la ventilazione avviene solo in modo naturale per mezzo di superfici aeranti che vengono aperte e chiuse manualmente o automaticamente con una certa periodicità durante la giornata non è possibile evitare l'ingresso di inquinanti dall'esterno: in queste situazioni le sorgenti inquinanti di tipo urbano ed in particolare derivanti da traffico veicolare rappresentano una problematica di grave entità, soprattutto per edifici situati in zone ad alta intensità veicolare.

Per ridurre la concentrazione degli inquinanti provenienti da **sorgenti esterne** all'edificio è necessario adottare alcuni sistemi e accorgimenti progettuali e comportamentali, da definire anche in funzione della destinazione d'uso dell'edificio.

La **filtrazione** è indispensabile per rimuovere il particolato dall'aria in ingresso al sistema, quindi l'adozione di filtri deve sempre essere prevista in corrispondenza delle prese d'aria esterna che viene poi trattata dall'impianto. Per il raggiungimento di standard di purezza più elevati si utilizzano filtri a carboni attivi per fermare inquinanti di tipo gassoso oppure filtri assoluti (HEPA – High Efficiency Particulate Air System) per la rimozione di particelle finissime, adatti ad applicazioni speciali (ad esempio per sale operatorie in contesto ospedaliero).

Il **posizionamento delle prese d'aria** è determinante per la purezza dell'aria e per ridurre i costi e gli oneri di manutenzione dei sistemi di filtrazione. E' indispensabile individuare punti di aspirazione distanti da aree di parcheggio e ad altezze tali da non risentire l'effetto della concentrazione degli inquinanti al piano stradale. Ad altezze elevate occorre tuttavia tenere conto della presenza eventuale di camini, bocchette di estrazione di altri edifici, torri di raffreddamento.

Quando le condizioni esterne sono particolarmente severe in presenza di inquinamento da traffico veicolare e l'edificio per sua costituzione non permette alternative adeguate, si possono adottare **sistemi automatici** che chiudono fisicamente gli ingressi dell'aria più esposti per periodi brevi che corrispondono ai picchi di concentrazione di inquinanti. Si possono adottare sistemi automatici sui serramenti o, in presenza di impianti canalizzati, valvole e serrande.

Sotto il profilo della gestione degli inquinanti esterni è determinante l'apporto delle **infiltrazioni** d'aria dall'esterno o da ambienti inquinati verso l'edificio: generalmente non è possibile realizzare strutture perfettamente stagne quindi le infiltrazioni sono sempre presenti in modo più o meno significativo nel bilancio dei flussi d'aria non controllabili.

Negli **ambienti interni** è preferibile individuare ed eliminare le sorgenti di sostanze inquinanti per evitare che si miscolino all'aria rendendone così più complesso il trattamento. Nel caso di produzione da parte di attività svolte internamente il controllo e la gestione degli inquinanti prodotti è tanto più efficace quanto il sistema aspirante opera nelle immediate vicinanze della sorgente, soprattutto per i composti e le sostanze nocive e potenzialmente pericolose. In numerose situazioni infatti è possibile localizzare e circoscrivere la sorgente.

Per trattare gli odori e la produzione di CO₂ prodotti necessariamente dagli individui all'interno degli ambienti confinati si utilizza la ventilazione con sistemi tali da garantire una corretta e omogenea diluizione dell'aria che corrisponde a una riduzione della concentrazione di sostanze inquinanti.

Generalmente è preferibile eliminare le sorgenti inquinanti perché l'incremento del tasso di ventilazione comporta costi energetici maggiori.

2.2.4 La CO₂ come indicatore di benessere

Il biossido di carbonio prodotto dagli individui è proporzionale all'intensità dell'attività metabolica, e quindi a tutte le sostanze prodotte dal corpo umano e rilasciate in ambiente, inclusi gli odori. Quindi pur non essendo una sostanza dannosa all'organismo, rappresenta un valido indicatore per poter quantificare le caratteristiche di salubrità dell'aria e per valutare l'adeguatezza della portata di ventilazione. La concentrazione di CO₂ segue andamenti transitori fino al raggiungimento dell'equilibrio (regime stazionario) fino ad un nuovo mutamento delle condizioni ambientali, fattori che incidono sulla corretta lettura dei parametri. Quando il valore di concentrazione misurato è superiore a quello di set-point (correlato ad una corretta ventilazione) ne deriva che il tasso di ventilazione non è stato correttamente progettato (o impostato).

Questa assunzione tuttavia è valida negli ambienti in cui la principale sorgente è da attribuire agli individui (ad esempio scuole, uffici, teatri) perché in presenza di altre sorgenti (fumo di sigaretta, vapore d'acqua) la correlazione sopra indicata potrebbe essere falsata e non fornirebbe un indicatore adeguato allo scopo.

La correlazione che permette di determinare il ricambio dell'aria in ambienti confinati in funzione della concentrazione di CO₂ è data dalla formula 2.2 valida per il regime stazionario.

$$C = C_b + \frac{q}{n \cdot V} \quad (2.2)$$

dove:

C = concentrazione di CO₂ in ambiente interno espressa in ppm

C_b = concentrazione di CO₂ in ambiente esterno (*background*) espressa in ppm

q = quantità di CO₂ prodotta all'interno dell'ambiente espressa in m³/h

n = numero di ricambi d'aria nel volume trattato espresso in 1/h

V = volume dell'ambiente trattato espresso in m³

La CO₂ prodotta dalle attività metaboliche è pari a q_p=20 l/s per persona, quindi conoscendo il numero di persone presenti in un ambiente (n_p) è possibile calcolare il valore di q, come indicato nella formula 2.3.

$$q = q_p \cdot n_p \quad (2.3)$$

Il volume di ricambio è la variabile dipendente del problema e si calcola come indicato nella formula 2.4.

$$n \cdot V = \dot{V}_p \cdot n_p \quad (2.4)$$

dove V_p è la portata di ricambio d'aria per persona.

Sostituendo la 2.3 e la 2.4 nella 2.2 si ottiene:

$$C = C_b + \frac{q_p \cdot n_p}{\dot{V}_p \cdot n_p} \quad (2.5)$$

Introducendo le dovute semplificazioni, noto C_b e il valore $q_p = 20$ l/h, si riscontra che il valore di concentrazione è inversamente proporzionale al ricambio d'aria per persona.

In figura 2.8 è riportato un grafico che mette in relazione l'aumento della concentrazione di CO_2 (in ppm) rispetto al valore di background (400 ppm) con la portata di ventilazione per occupante.

La condizione di accettabilità corrisponde a una concentrazione totale *indoor* di circa 1000 ppm, 600 oltre il valore di *background*, per ottenere la quale occorrono 10 l/s a persona (36 m³/h a persona).

Il valore di 1500 ppm corrisponde ad esempio all'incirca a una portata di ventilazione pari a 4 lt/s per persona.

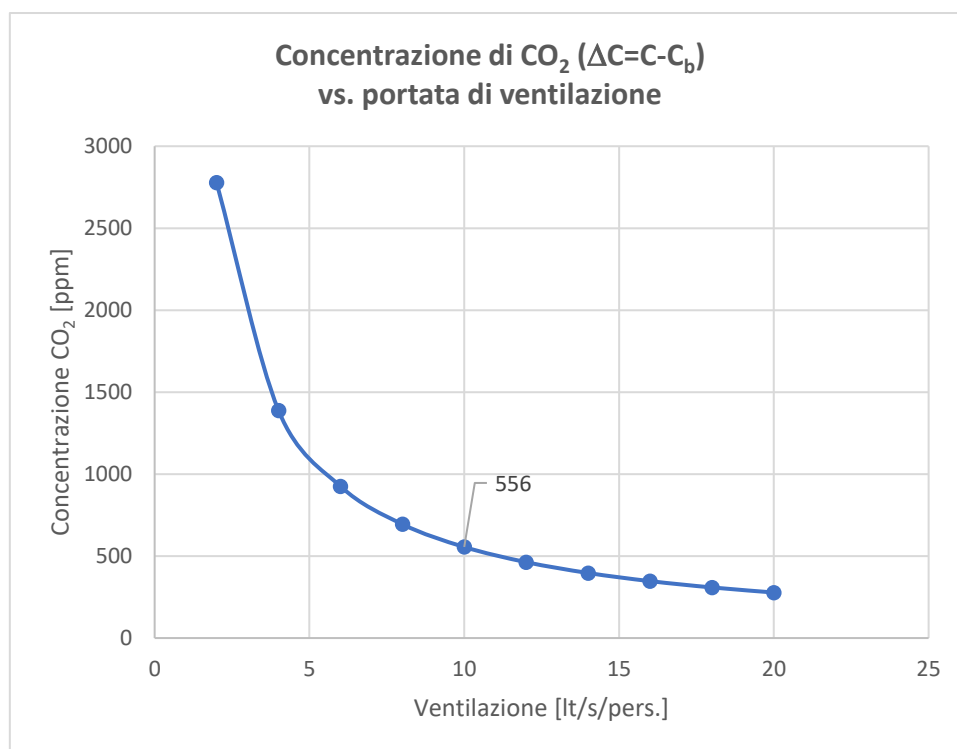


Fig. 2.8 – Correlazione tra concentrazione di CO₂ e portata di ventilazione

2.3 La filtrazione dell'aria

Il sistema di filtrazione dell'aria è un componente essenziale degli impianti di ventilazione meccanica, soprattutto nelle situazioni che prevedono:

- elevate concentrazioni di inquinanti diluiti nell'aria esterna di rinnovo
- elevate concentrazioni di contaminanti prodotti da sorgenti endogene e presenti nell'aria di ricircolo
- elevate portate di aria di ricambio

La tipologia dei sistemi filtranti deve essere adattata in funzione della destinazione d'uso dell'ambiente trattato, tenendo conto della presenza degli inquinanti presenti e del volume di aria da trattare.

Un primo criterio per la scelta del sistema filtrante dipende dalle dimensioni del tipo di inquinante da trattare. A tale proposito si possono classificare le polveri disperse in aria secondo la concentrazione e la granulometria, come indicato nella tabella 2.4.

Tipologia di Zona	Concentrazione media (mg/m ³)	Dimensione più frequente delle particelle (μ)	Dimensione massima delle particelle (μ)
Zone rurali			
Tempo umido	0.05	0.8	4
Tempo asciutto	0.15	2.0	25
Zone urbane			
Aree residenziali	0.40	7.0	60
Aree industriali	0.75	20.0	100
Distretti industriali	>3	60	1000

Tab. 2.4 – Concentrazione e granulometria polveri sospese in aria

La scelta del meccanismo di filtrazione adatto alle singole e specifiche applicazioni deve tenere in considerazione le dimensioni delle particelle e la loro velocità nel flusso di aria trattata in relazione alla loro interazione con l'elemento filtrante. Normalmente un filtro impiega più di un principio fisico, privilegiandone uno su tutti gli altri. Tra i meccanismi si possono citare i seguenti:

- **Setaccio:** il funzionamento arresta le particelle più grosse come fibre, fibrille, filacci, parti di peli. Il mezzo filtrante ha diametro grossolano e normalmente viene impiegato come pre-filtro.
- **Inerzia o collisione:** si basa sul principio per cui le particelle trascinate dal flusso dell'aria collidono per inerzia con le fibre costituenti il filtro e qui aderiscono per viscosità. L'efficacia della filtrazione aumenta con l'aumento della velocità dell'aria (entro certi limiti), del diametro delle particelle e con la riduzione degli interstizi tra le fibre.
- **Intercettazione:** le particelle di particolato più fine, trascinate dalla traiettoria del flusso dell'aria, passando in prossimità delle fibre del mezzo filtrante vengono fissate per attrazione elettrostatica (forza di Van der Waals). Questo principio è utilizzato nei filtri "fini" a medio/alto rendimento. All'interno di determinati campi di velocità, questa non ha una particolare incidenza sull'efficacia del filtro.
- **Diffusione:** si applica per trattare particelle di diametro inferiore al micron che, oltre al trascinamento del flusso d'aria assumono un moto oscillatorio generato dalla collisione con le molecole dell'aria. Le due componenti del moto inducono le particelle al contatto con le fibre del filtro. L'efficacia del filtro aumenta con il diminuire del diametro delle particelle e con la riduzione della velocità dell'aria. Su questo principio fisico si basa il funzionamento dei filtri ad alta/altissima efficienza detti anche "semiassoluti" o "assoluti" (HEPA – High Efficiency Particulate Airfilter e ULPA – Ultra Low Penetration Airfilter).

- **Attrazione elettrostatica:** consiste nell'applicazione di un campo elettrico al flusso di aria per generare una carica elettrica sulle particelle con diametri da 0,1 a 40 μ ; nella parte successiva del filtro sono disposti due elettrodi alternativamente soggetti a potenziale positivo e negativo che attraggono le particelle trattenendole grazie alla superficie viscosa.

L'efficienza di filtrazione è determinata principalmente in base a tre metodi riconosciuti dalla norma ASHRAE, brevemente riassunti di seguito.

1) Metodo gravimetrico (o ponderale): è anche denominato *Synthetic Dust Weight Arrestance Test* in quanto si basa sull'aumento di peso del filtro di controllo al termine della prova.

2) Metodo opacimetrico (o colorimetrico): è anche denominato *Atmospheric Dust Spot Efficiency Test* in quanto si basa sul grado di annerimento di filtri campione, valutato per mezzo di un colorimetro. Al termine della prova si misura il diverso grado di colorazione tra la carta di filtro a valle e quello a monte del filtro da testare tramite un colorimetro: maggiore è la differenza migliore è l'efficienza (E) del filtro.

3) Metodo DOP (diottilftalato): è utilizzato per filtri caratterizzati da efficienze superiori al 98%. Per valutare l'efficacia del filtro, nell'aria, precedentemente filtrata con filtri assoluti, sono immesse goccioline (diametro 0.3 μ m) di diottilftalato, con una concentrazione stabile di 80 mg/m³. Tramite fotometri, misurando la luce diffusa da goccioline presenti in sospensione in aerosol, vengono contate tali goccioline a monte (CM) e a valle del filtro (CV), ottenendo così il rapporto di penetrazione (RC):

La classificazione dei filtri viene definita da specifiche normative: in Europa grazie a un processo di normalizzazione iniziato nei primi anni '90 si è raggiunto un quadro che prevede una ripartizione in famiglie come indicato nella tabella 2.5.

Tipologia filtri	Classe	Normativa di riferimento
Filtri primari o sgrossatori o pre-filtri	G1, G2, G3 G4	EN 779-2012
Filtri medi	M5, M6	EN 779-2012
Filtri fini	F7, F8, F9	EN 779-2012
Filtri semi-assoluti	E10, E11, E12	EN 1822
Filtri assoluti HEPA (<i>High Efficiency Particulate Airfilters</i>)	H13, H14	EN 1822
Filtri assoluti ULPA (<i>Ultra Low Penetration Particulate Filters</i>)	U15, U16, U17	EN 1822

Tab. 2.5 – Classificazione filtri aria per famiglie

Le normative sopra indicate forniscono le caratteristiche di prova cui devono essere sottoposti i filtri per determinare la classe di efficienza.

La EN 779 prevede una prova di tipo distruttivo perché porta a intasamento il filtro campione fino al raggiungimento di un valore di caduta di pressione predeterminato, introducendo come sostanza una polvere sintetica (classe G) oppure un tracciante (classi M e F) e valutando i risultati ottenuti con particelle di dimensione $0,4\ \mu\text{m}$. Per i filtri di classe F è prevista una efficienza minima. Per i filtri di classe G il parametro che esprime l'efficienza è la arrestanza media ($A_m\%$) dell'elemento filtrante, mentre per quelli di classe M e F si considera l'efficienza media.

La EN 1822 è utilizzata per la classificazione dei filtri di classe E, H e U e prevede prove di tipo non distruttivo eseguite su ogni singolo filtro uscente dalla produzione, che verrà quindi etichettato con un proprio numero di matricola. Ogni filtro viene classificato in base alla dimensione delle particelle trattate e alla velocità dell'aria, parametri che incidono sulla classe del prodotto. Sulla curva caratteristica che riporta la sezione della particella e l'efficienza del filtro si individua il punto di minimo (MPPS) che rappresenta il punto di massima penetrazione e che viene assunto come valore dell'efficienza media del filtro.

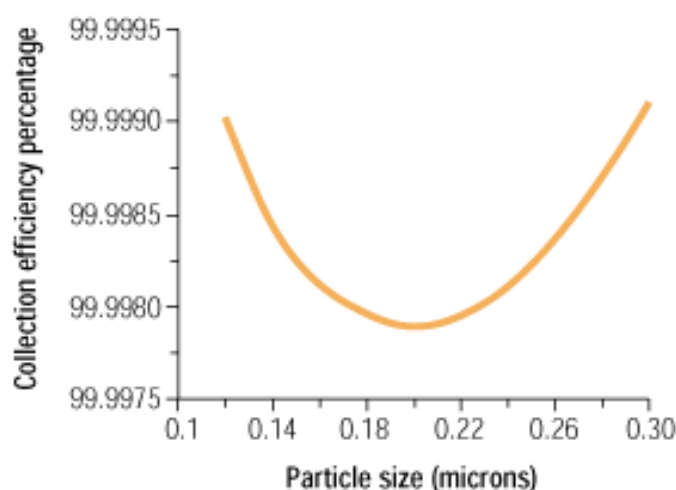


Fig. 2.9 – Curva di efficienza e MPPS (Fonte: Aerofeel)

Nelle tabelle 2.6 e 2.7 sono riportate le classificazioni dei filtri secondo le norme EN 779 e EN 1822.

Tipologia	Classe	Arrestanza media $A_m(\%)$	Efficienza media $E_m(\%)$	Efficienza minima $M_e(\%)$	Caduta di pressione finale [Pa]
Pre-filtri EN 779	G1	50 – 65			250
	G2	65 – 80			250
	G3	80 – 90			250
	G4	≥ 90			250
Filtri medi EN 779	M5		40 – 60		450
	M6		60 – 80		450
Filtri fini EN 779	F7		80 – 90	35	450
	F8		90 – 95	35	450
	F9		≥ 95	70	450

Tab. 2.6 – Classificazione filtri secondo EN 779-2012

Tipologia	Classe	Efficienza media (%)	Penetrazione (%)	Efficienza minima Valore locale (%)	Penetrazione minima Valore locale (%)
Filtri EPA	E10	85	15		
	E11	95	5		
	E12	99,5	0,5		
Filtri HEPA	H13	99,95	0,05	99,75	0,25
	H14	99,995	0,005	99,975	0,025
Filtri ULPA	U15	99,9995	0,0005	99,9975	0,0025
	U16	99,99995	0,00005	99,99975	0,00025
	U17	99,999995	0,000005	99,9999	0,0001

Tab. 2.7 – Classificazione filtri secondo EN 1822-1

2.4 Sindrome dell'edificio malato (SBS)

La scarsità di purezza dell'aria e il conseguente livello di disagio avvertito dalle persone all'interno di un edificio nelle molteplici variabili del problema si manifesta talvolta nell'insorgenza di sintomi percepiti dalle persone, determinando la cosiddetta sindrome dell'edificio malato (S.B.S. – *Sick Building Syndrome*). Tra i sintomi si riscontrano: gola secca, irritazione alla pelle e agli occhi, perdita di concentrazione, mal di testa, apatia.

I parametri che concorrono alla sindrome sono molteplici e vanno esaminati sia singolarmente sia in correlazione gli uni rispetto agli altri, quindi l'analisi approfondita delle

problematiche connesse risulta essere complessa e tende ad essere molto estesa. I principali elementi che concorrono alla SBS sono:

- tipologia di edificio
- collocazione urbana dell'edificio (prossimità di sorgenti inquinanti esterne)
- destinazione d'uso dell'edificio e tipologia delle attività svolte
- tipologia di occupanti (età, genere, stato di salute, vulnerabilità)
- sistema impiantistico presente per la climatizzazione
- presenza o assenza di ventilazione, filtrazione dell'aria, adeguatezza nella manutenzione
- caratteristiche dei materiali interni (arredi, tessuti)
- sorgenti specifiche di inquinamento interno

Generalmente l'elemento debole comune a tutti gli studi sulla SBS è caratterizzato dalla ventilazione non adeguata, una carente manutenzione degli impianti, non corretta gestione delle sorgenti di inquinanti interne all'edificio, cattiva o carente filtrazione dell'aria esterna, eccessiva incidenza delle infiltrazioni d'aria (non controllabili).

E' importante la pulizia periodica e accurata dell'impianto, sia negli scambiatori di calore, sia nella canalizzazione e nelle bocchette. Impianti non adeguatamente monitorati e igienizzati possono rappresentare un elevato rischio per la diffusione di sostanze inquinanti e batteri diluiti all'aria, e quindi diventare origine del problema per il quale l'impianto stesso dovrebbe esserne la soluzione.

Trattandosi di una problematica di carattere sanitario, la sindrome dell'edificio malato è studiata anche sotto il profilo dei costi sociali specialmente negli ambienti lavorativi dove le caratteristiche scadenti dell'aria determinano una diminuzione complessiva del rendimento di produzione e dell'operatività dei lavoratori.

Nonostante negli anni più recenti sia stato affrontato il tema della SBS con la raccolta di dati e con studi approfonditi, tuttavia questa esperienza non è ancora sufficiente per poter definire un quadro scientificamente più solido. Occorrono infatti studi epidemiologici eseguiti su larga scala e su più edifici poiché verificarsi di alterazioni ambientali anche significative in alcuni casi specifici non può giustificare una sintomatologia connessa con la permanenza negli edifici analizzati.

2.5 Il progetto S.E.A.R.C.H.

Il progetto europeo SEARCH (*School Environment and Respiratory Health of Children*) nasce in seno alla IV Conferenza dei Ministri dell'Ambiente e della Salute dei 53 Paesi facenti parte della regione europea dell'Organizzazione Mondiale della Sanità con il coinvolgimento diretto dei sei Paesi dell'Unione Europea (Italia, Albania, Bosnia, Erzegovina, Serbia, Slovacchia). Nel triennio 2007/2010 (fase I) e 2010/2013 (fase II) sono state svolte attività di indagine ambientale nelle scuole selezionate in ogni Paese attraverso questionari e campagne di misurazione ambientale interne ed esterne e mediante la valutazione della salute respiratoria dei bambini mediante analisi spirometriche. Lo scopo principale del progetto è la promozione del miglioramento della qualità dell'aria indoor nelle scuole, per ridurre il rischio di problemi respiratori acuti e cronici e la frequenza delle crisi allergiche in bambini sensibili.



Oltre alla valutazione dello stato di salute delle scuole e dei bambini, il progetto si propone di:

- incoraggiare la definizione di proposte di misure facilmente attuabili per ridurre il rischio di esposizione dei bambini all'inquinamento indoor coinvolgendo e sensibilizzando le famiglie e il personale scolastico;
- promuovere iniziative per aumentare la consapevolezza sui fattori di rischio ambientale nelle scuole di tutti gli attori coinvolti nella gestione della qualità dell'aria indoor nelle scuole, tra cui i Dirigenti Scolastici e i Politici a livello locale.

In termini numerici il progetto in Italia ha coinvolto 13 scuole in 6 regioni per un totale corrispondente di circa 1000 alunni.

Gli Enti preposti al coordinamento del progetto sono il Ministero dell'Ambiente, ISPRA, Fondazione Maugeri, FEDERA SMA onlus, mentre le azioni di monitoraggio sono state curate dalle sezioni regionali di ARPA sotto il coordinamento di ARPA Lombardia.

Il progetto evidenzia le problematiche di tipo respiratorio e allergenico dei bambini e ragazzi, mettendo in evidenza i seguenti aspetti:

- Il tempo di permanenza dei bambini nell'ambiente scolastico è elevato
- I bambini sono fisiologicamente deboli per un incompleto sviluppo del sistema immunitario, pertanto gli effetti della assunzione di inquinanti per via respiratoria sono maggiormente incisivi rispetto ad un adulto
- I disturbi legati alle malattie respiratorie e all'asma nei bambini sono statisticamente in aumento
- Risultano evidenze scientifiche nell'origine pediatrica di malattie polmonari nell'adulto
- L'incremento di malattie respiratorie ricorrenti negli allievi determina complessivamente difficoltà nell'apprendimento (anche per le assenze) e una riduzione delle potenzialità complessive nell'apprendimento.

Da queste considerazioni nasce l'attenzione alla qualità dell'aria negli ambienti scolastici e alla ricerca dei fattori che determinano lo scostamento dai livelli di accettabilità.

Un primo importante elemento è la compresenza di più persone in ambienti delimitati in cui sono presenti fonti di inquinamento indoor (arredi, tessuti, materiali didattici, materiali da costruzione): queste possono avere effetti negativi particolarmente nei soggetti vulnerabili alle vie respiratorie. I fattori di rischio ambientale di natura chimica, biologica e fisica sono molteplici negli ambienti affollati.

Altra componente significativa è la valutazione dell'inquinamento derivante dall'ambiente esterno per infiltrazioni nell'edificio o per l'assenza di adeguati sistemi di filtraggio negli impianti meccanizzati per la ventilazione. L'accumulo negli ambienti di sostanze quali polveri e composti chimici provenienti dall'esterno è determinante per la qualità dell'aria.

Particolare attenzione merita la presenza di formaldeide, presente nelle sostanze utilizzate per la finitura degli arredi, che viene rilasciata in quantità che sono in funzione della temperatura e del tasso di umidità dell'ambiente.

Il progetto, grazie ad un campionamento di misure e dati reali, ha evidenziato come nella realtà sia indispensabile un maggiore raccordo tra le normative vigenti e un completamento delle stesse, atto a coprire in modo più armonico e coordinato, aspetti per i quali le norme sono carenti, incomplete o obsolete.

Dal progetto SEARCH emergono quindi 2 elementi determinanti:

1. Obiettivi: miglioramento delle condizioni indoor e quindi riduzione assenze per malattie, maggiore concentrazione e lucidità di insegnanti ed allievi, migliore resa, riduzione dei fattori causa di malattie respiratorie, asma e allergia, miglioramento delle condizioni di permanenza negli ambienti per i soggetti vulnerabili.
2. Azioni e atteggiamenti: miglioramento della ventilazione e del ricambio dell'aria, attenzione all'impiego di prodotti per la pulizia e alle tempistiche rispetto all'orario scolastico, riduzione di accumuli di polvere, adeguati comportamenti nella gestione dei generi alimentari

Nel caso di interventi di ristrutturazione, incrementano le possibilità e le scelte per garantire una corretta qualità dell'aria negli ambienti, tenendo in considerazione i seguenti aspetti:

In materia di Impianti: garantire un adeguato volume d'aria pro capite, utilizzare sistemi filtranti (filtri HEPA), incrementare l'efficienza energetica del sistema, implementare sistemi adeguati di ventilazione meccanica

In materia di installazioni interne e arredamenti: impiego di materiali con superfici lisce, evitare tendaggi interni (ove possibile), provvedere a frequenti lavaggi di tende, preferire tende esterne (parasole) più efficaci contro l'irraggiamento eccessivo, evitare tinte o vernici o prodotti contenenti formaldeide e altri VOC dannosi.

Il progetto SEARCH evidenzia che la problematica della qualità dell'aria assume un ruolo trasversale coinvolgendo molti ambiti e discipline e non trovando un adeguato riscontro in termini legislativi e normativi.

Nel quadro generale descritto in ambito SEARCH la ventilazione meccanica controllata e l'efficienza energetica del sistema edificio/ impianto sono elementi di grande importanza e determinanti per il conseguimento degli obiettivi.

3 EFFICIENZA ENERGETICA NELLA VENTILAZIONE

La ventilazione di un qualsiasi edificio climatizzato comporta sia per il regime invernale (riscaldamento) sia per il regime estivo (raffrescamento) un costo energetico che merita attenzione. Questo vale in particolare per edifici di nuova costruzione in cui i limiti di Legge per la progettazione riguardanti trasmittanza termica, trasmittanza termica periodica, superfici riflettenti, ombreggiamenti sono stringenti spostando di fatto l'ago della bilancia energetica verso la ventilazione. Tuttavia anche nelle ristrutturazioni sul parco edifici esistente, con l'introduzione di coibentazioni (coperture, cappotto perimetrale, sostituzione serramenti) l'apporto della ventilazione in termini di energia primaria assume grande importanza per garantire un adeguato ricambio di aria a fronte di una crescente riduzione delle infiltrazioni.

3.1 La ventilazione nel bilancio energetico dell'edificio

L'incidenza della ventilazione sul bilancio energetico degli edifici è un fattore determinante che induce alla ricerca di sistemi e tecnologie mirate all'efficienza energetica, riducendo al minimo le portate di aria da trattare e limitando per quanto possibile le infiltrazioni.

Nel bilancio energetico dell'edificio i flussi di aria svolgono un ruolo importante in quanto fluido termovettore. Possono essere considerate due componenti:

a) dispersioni per ventilazione dai volumi climatizzati verso l'esterno: è la componente significativa in quanto dipende dalla tipologia di ventilazione adottata per l'edificio o per i singoli locali ed è necessaria per garantire le condizioni di salubrità dell'aria. Statisticamente la ventilazione incide per una quota variabile dal 30% al 50% sul fabbisogno di energia primaria dell'edificio, quindi l'adozione di tecniche per il controllo della ventilazione comporta un risparmio energetico apprezzabile e traducibile anche in termini economici.

b) energia termica prodotta da sorgenti interne: è una componente importante da tenere in considerazione sia nel periodo invernale in cui tali apporti rappresentano spesso un contributo positivo al bilancio complessivo, sia nel periodo estivo in cui essi rappresentano un ulteriore carico termico da sommare al bilancio energetico con il rispettivo incremento di fabbisogno energetico. La riduzione di apporti interni di calore dipende fortemente dal tipo di attività svolta, da eventuali apparecchiature utilizzate e dal loro grado di efficienza energetica (maggiore efficienza = minori dispersioni termiche). Esempi significativi sempre più diffusi nel contesto scolastico sono i laboratori di informatica, caratterizzati da un utilizzo non continuativo ma con una intensità di apporti termici endogeni elevata.

La ventilazione compare nel bilancio energetico dell'edificio espresso in forma generale nell'equazione 3.1.

$$Q_{cli} + Q_{tr} + Q_{ve} + Q_{gains} = 0 \quad (3.1)$$

in cui:

Q_{cli} = fabbisogno energetico per la climatizzazione

Q_{tr} = componente energia dispersa per trasmissione attraverso l'involucro

Q_{ve} = componente energia dispersa per ventilazione

Q_{gains} = componente energia prodotta da apporti gratuiti

L'equazione 3.1 come scritta è valida sia per il regime di funzionamento invernale sia per quello estivo, assumendo il segno dei singoli addendi in funzione del verso del flusso termico (energia entrante positiva, energia uscente positiva).

La regolazione delle portate di ventilazione meccanica, nel rispetto delle condizioni di salubrità dell'aria nei limiti previsti dalle normative, contribuisce al mantenimento dell'equilibrio del sistema, che rappresenta la situazione ottimale di efficienza energetica. Una ventilazione ridotta si traduce proporzionalmente in risparmio di energia. L'impiego di tecnologie che permettono una corretta regolazione del tasso di ricircolo dell'aria è quindi uno dei principali aspetti per l'efficienza energetica.

Il calcolo del fabbisogno energetico per la ventilazione dell'edificio si basa principalmente sui seguenti dati di riferimento:

- portata in massa dell'aria in ingresso e in uscita dall'edificio
- differenza di entalpia tra l'aria entrante e uscente dal volume trattato

Il calcolo dell'entalpia comprende la componente di calore "sensibile" legata alla differenza di temperatura di bulbo secco e la componente di calore "latente" che tiene conto del grado di umidità del flusso di aria.

La **portata di aria** per la ventilazione è determinata in fase progettuale in modo tale da garantire i requisiti minimi previsti dalla normativa e dalla legislazione vigente applicabile al contesto specifico, secondo la tipologia di edificio e la destinazione d'uso dei locali. Generalmente si assume un valore di ricambio d'aria non inferiore a 0,5 o 1,0 volume/ora, con riferimento in particolare alla norma UNI 10339 già ampiamente descritta nel capitolo 1.

Per una valutazione preliminare di progetto, la stima corretta della portata di aria si può calcolare secondo la teoria di Fanger mediante l'impiego di portate specifiche per persona, pari a circa 30 – 36 m³/h per persona, a prescindere dal volume del locale. A livello generale, questo approccio consente inoltre di raggiungere con buona approssimazione una valutazione del fabbisogno di ricambio d'aria per settori (residenziale, uffici, scuole, servizi) su un territorio specifico, assumendo condizioni al contorno omogenee e comuni.

In alcune situazioni è invece possibile adottare un metodo diretto basato su misurazioni effettuate direttamente nel locale nelle diverse condizioni di utilizzo, in funzione delle caratteristiche del clima esterno, del clima *indoor*, del numero e delle attività svolte dagli occupanti utilizzando ad esempio tecniche di misura con gas traccianti.

Il calcolo della **variazione di entalpia** nella stagione invernale si riconduce con buona approssimazione alla variazione di temperatura dell'aria in quanto non vi sono trasformazioni

termodinamiche sullo stato del vapore d'acqua. Nelle condizioni estive invece è fondamentale per tenere conto dell'energia richiesta sottoforma di calore latente nella variazione del tasso di umidità dell'aria.

Il diagramma psicrometrico come quello rappresentato in figura 3.1, consente di calcolare il fabbisogno energetico nelle trasformazioni dell'aria umida (riscaldamento, raffreddamento, deumidificazione, miscela di portate).

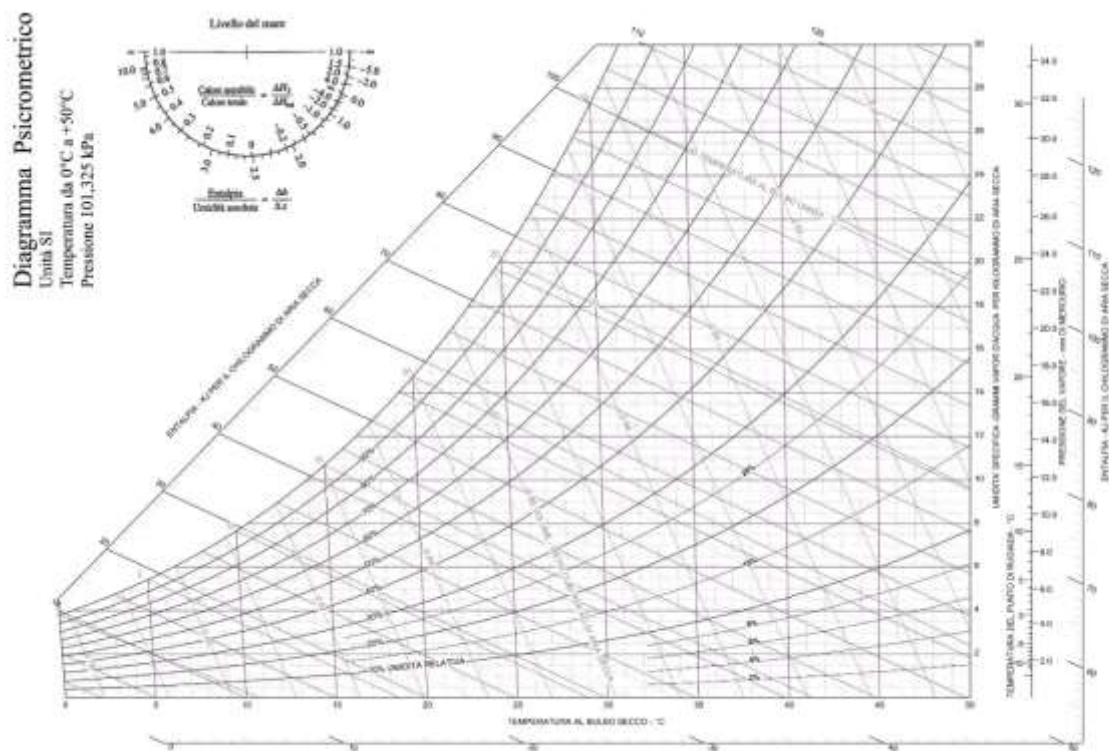


Fig. 3.1 – Diagramma psicrometrico

Ai fini progettuali o per il calcolo del fabbisogno energetico, in contesti specifici si possono effettuare misurazioni ambientali interne ed esterne dirette. Tuttavia un metodo indiretto ed efficace consiste nella analisi dei Gradi-Giorno, parametro definito come la sommatoria delle differenze di temperatura interna ed esterna per ogni giorno nel periodo di funzionamento degli impianti (in particolare per la stagione di riscaldamento). Nel periodo estivo questo metodo prende in considerazione oltre alle temperature i valori medi di umidità esterna (classificati in base all'area geografica e al clima) e interna, a seconda della tipologia e della destinazione d'uso dell'edificio.

Per poter raggiungere risultati più precisi si può utilizzare il metodo cosiddetto dei “*bin*”. Si tratta dell’impiego di tabelle in cui vengono messe in correlazione le caratteristiche climatiche in funzione del numero di ore nell’anno in cui esse si sono verificate. Grazie a una quantità di informazioni molto più ampia rispetto ai gradi-giorno il calcolo del fabbisogno energetico avviene puntualmente su base oraria, con la possibilità di simulare orari e periodi di funzionamento effettivo dell’impianto e di valutare condizioni nominali (di progetto), medie o limite. E’ possibile inoltre stimare i consumi in relazione ad una maggiore o minore flessibilità dell’impianto rispetto ai parametri ambientali e quindi alla regolazione.

Se nel caso di ventilazione naturale avviene una semplice diluizione (e non rimozione) degli inquinanti in ambiente, senza di fatto avere la possibilità di controllo sui flussi dell’aria, nel caso di ventilazione meccanica occorre definire le tipologie di impianto in base alle funzioni.

Una prima distinzione è basata sui flussi di aria:

- impianto a semplice flusso (sola estrazione o sola immissione)
- impianto a doppio flusso (immissione ed estrazione)

Nel primo caso è possibile controllare la portata e la velocità dell’aria ma non si può agire sulla dispersione termica corrispondente all’immissione di aria di rinnovo (fredda in estate e calda in inverno) il cui effetto sull’ambiente deve essere compensato dall’impianto. Nel secondo caso i flussi di immissione ed estrazione sono convogliati in due circuiti indipendenti e separati, ognuno dei quali è equipaggiato con proprio ventilatore e sistema di filtrazione. Rispetto al primo caso è possibile quindi:

1. regolare la direzione dei flussi di aria ottimizzando il “lavaggio” dei locali in termini spaziali (efficienza di ventilazione)
2. adottare sistemi di filtrazione per limitare l’apporto di inquinanti dall’ambiente esterno verso l’ambiente interno.

Gli impianti a doppio flusso possono essere dotati di scambiatore termico del tipo aria/aria per il recupero del calore del flusso in uscita in modo da rendere il sistema più efficiente e ridurre i costi energetici ed economici nella gestione dell’impianto.

Una funzione ulteriormente migliorativa è il controllo del funzionamento dell’impianto nel tempo, che ottimizza la portata di aria a seconda delle effettive esigenze del locale utilizzando sensori di tipo retroattivo per il monitoraggio costante della qualità dell’aria in ambiente (concentrazione di CO₂). In questo caso si definisce “ventilazione meccanica controllata” (VMC).

3.2 Le infiltrazioni di aria

Un fenomeno presente in tutti gli edifici, in modo più o meno marcato, è la presenza di infiltrazioni d'aria, provenienti da fessurazioni caratteristiche dell'involucro delimitante lo spazio climatizzato. Numerose sono le problematiche connesse alla presenza di infiltrazioni, in particolare:

- In presenza di sistemi di sola estrazione dell'aria tipici di ambienti ciechi, servizi e cucine, le infiltrazioni diventano vere e proprie aperture per compensare, anche in via temporanea, la depressione generata all'interno degli ambienti, con conseguente trasporto di impurità dall'esterno
- Le infiltrazioni d'aria non possono essere controllate con sistemi di filtrazione pertanto negli edifici in cui si manifestano in modo importante (fessurazioni nelle giunzioni tra pareti e copertura, fori per canne fumarie non perfettamente sigillati, serramenti in cattivo stato di manutenzione) possono comportare un degrado della qualità dell'aria piuttosto significativo
- Negli edifici recenti, costruiti con sistemi e tecnologie innovative, con serramenti ad elevata tenuta, occorre valutare attentamente le infiltrazioni che provengono dal passaggio di aria in corrispondenza di porte comunicanti con ambienti quali ad esempio cantine, autorimesse, depositi.

Un metodo per quantificare in cantiere la tenuta all'aria dell'edificio e quindi l'incidenza delle infiltrazioni è il test denominato *blower door test* (ISO 9972).

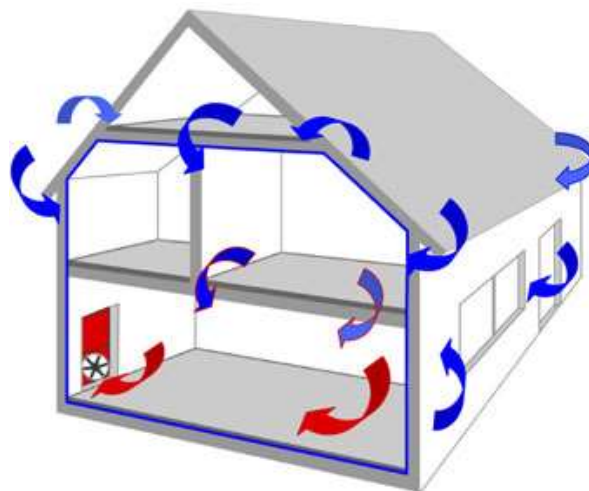


Fig. 3.2 – Infiltrazioni di aria con blower door test

Negli edifici sprovvisti di ventilazione meccanica gli elementi che concorrono alla generazione di infiltrazioni sono:

- la disposizione dell'edificio rispetto alle correnti dei venti
- la posizione delle fessure rispetto alla geometria dell'edificio (esempio in figura 3.3)
- Tipologia di serramenti
- Pressione atmosferica (differenza di pressione sui lati dell'edificio)
- Differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno.

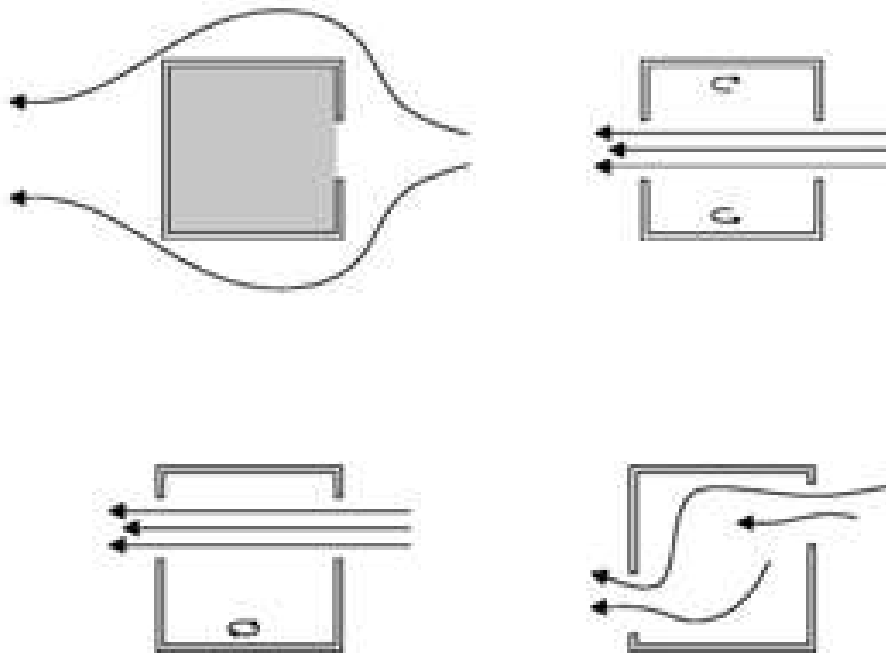


Fig. 3.3 – Modelli esemplificativi di ventilazione (sezioni orizzontali)

3.3 Recupero termico nella ventilazione

Per migliorare l'efficienza energetica del sistema, oltre alla corretta regolazione degli impianti per variare la portata nominale secondo effettivo fabbisogno, è possibile adottare sistemi di recupero termico del calore.

Il recupero termico nella ventilazione consiste nei sistemi che permettono di estrarre energia dall'aria del flusso in estrazione cedendola direttamente o indirettamente al flusso d'aria entrante (di rinnovo). Nelle applicazioni tradizionali si adottano scambiatori aria/aria o pompe di calore mentre possono esserci altre soluzioni più avanzate e architettonicamente integrate che contemplano l'utilizzo dell'involucro o di parti di esso come scambiatore e/o recuperatore di energia.

L'efficienza di uno scambiatore di calore è definita come rapporto tra l'energia trasmessa dal fluido primario al fluido secondario e il valore massimo dell'energia trasmissibile. Considerando la configurazione indicata in figura 3.4, si possono dare le seguenti definizioni:

$$\varepsilon = \frac{W_{in} \cdot (X_2 - X_1)}{W_{min} \cdot (X_3 - X_1)} = \frac{W_{ext} \cdot (X_4 - X_3)}{W_{min} \cdot (X_3 - X_1)} \quad (3.2)$$

dove:

W indica la portata (aria immessa, aria estratta, minima tra immessa ed estratta)

X indica il contenuto entalpico, tenendo conto delle componenti sensibile e latente del calore trasmesso

L'efficienza dei sistemi di recupero termico è piuttosto elevata, a partire da un valore minimo di circa 70% quindi, considerando la quantità di energia dispersa per ventilazione, i benefici attesi dalle azioni per il recupero termico dalla ventilazione in termini di costi energetici ed economici è piuttosto interessante. Per l'analisi tecnico-economica occorre tenere conto dell'energia primaria richiesta per l'alimentazione del sistema, dei costi di installazione e di manutenzione e l'incidenza delle infiltrazioni. I fattori principali dai quali dipende la corretta implementazione del sistema sono:

- integrazione del sistema di recupero nell'impianto di ventilazione (ove esistente)
- scelta accurata delle apparecchiature e del dimensionamento
- corretta manutenzione ordinaria (inclusa pulizia) e straordinaria
- bassa permeabilità all'aria dell'edificio

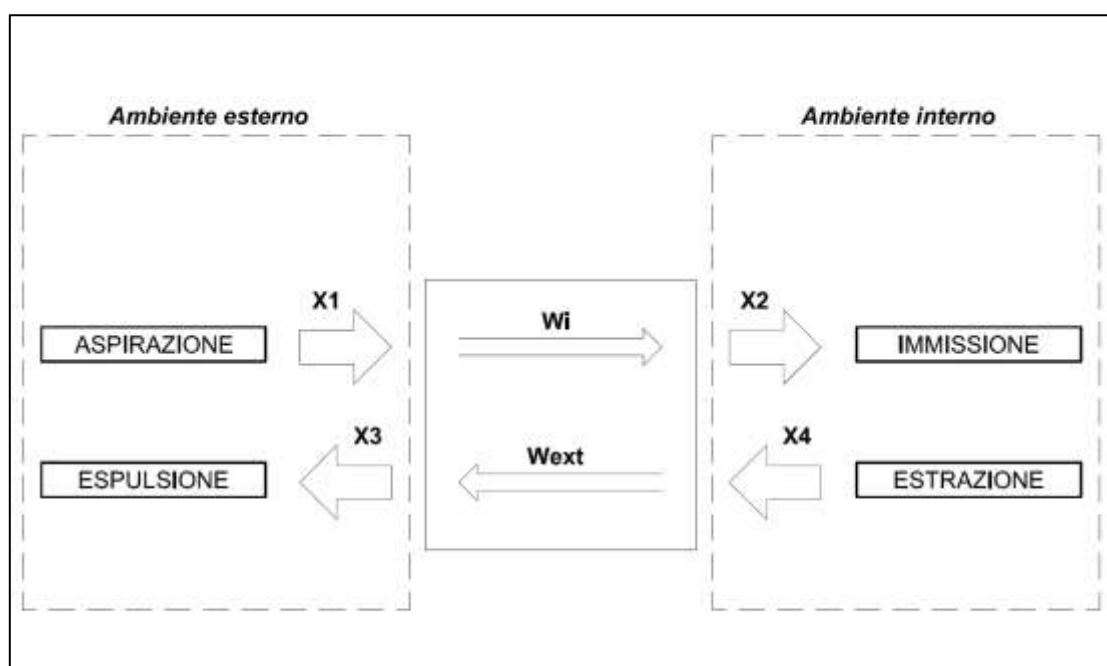


Fig. 3.4 – Schema esemplificativo flussi in scambiatore aria/aria

Le condizioni di funzionamento di uno scambiatore sono soggette a una riduzione delle prestazioni in relazione ai seguenti aspetti:

- **sporcamento:** è determinato dall'accumulo di particelle di polveri unitamente a condensa sulle superfici; comporta una riduzione del coefficiente di scambio termico e maggiori perdite di carico con conseguente incremento del fabbisogno di potenza al ventilatore
- **trafilamento:** il passaggio (con miscelazione) di aria tra i due lati dello scambiatore comporta una riduzione del rendimento e in alcune situazioni può compromettere la qualità dell'aria in ingresso che viene contaminata da quella in espulsione.
- **Manutenzione:** prevede la rimozione periodica di polveri e fibre accumulate sulle superfici di scambio one evitare riduzioni del rendimento e perdite di carico aggiuntive. Un buon sistema di filtrazione riduce gli interventi e i costi di manutenzione. Nei sistemi complessi occorre considerare anche le parti in movimento (motori, pulegge, cinghie) ed eventuali sistemi e circuiti ausiliari

Nei paragrafi seguenti sono illustrati alcuni sistemi adottati per il recupero termico tra flussi di aria.

3.3.1 Recuperatore statico aria/aria a piastre

I recuperatori a piastre per lo scambio termico tra due flussi di aria non hanno parti in movimento e sono quindi caratterizzati da una elevata affidabilità e durata nel tempo. Lo scambiatore è di geometria piuttosto semplice e viene realizzato dalla sovrapposizione di piastre atte a formare setti separati e alternati in cui i due fluidi percorrono il mezzo.

Il principio dello scambio termico si basa su convezione (sulle due facce della piastra a contatto con i fluidi) e conduzione attraverso la piastra, che assume una incidenza preponderante rispetto allo scambio convettivo.

Il materiale impiegato per la costruzione dello scambiatore può variare e dipende dalla tipologia di impiego: generalmente l'utilizzo di alluminio e leghe di alluminio conferisce una buona resistenza alla corrosione, semplicità di realizzazione e affidabilità. Per impieghi in ambienti più severi è preferibile proteggere con apposite vernici le superfici fino ad introdurre materiali più costosi e meno soggetti alla corrosione quali l'acciaio inox e le sue leghe. Questa tipologia di scambiatori consente il trasferimento del calore sensibile e del calore latente, quando la temperatura scende al di sotto del punto di rugiada.

Nonostante la migliore condizione di scambio sia ottenuta con configurazione in controcorrente, nella maggior parte delle applicazioni commerciali lo scambiatore è progettato per funzionare a flussi incrociati, caratteristica che consente di raggiungere un buon compromesso tra rendimenti elevati e dimensioni di ingombro ridotte.

In applicazioni specifiche è necessario considerare opportune protezioni per il rischio di formazione di ghiaccio e comunque è necessario prevedere uno scarico per la condensa.

Grazie alla semplicità costruttiva, alla elevata affidabilità e alla modularità il recuperatore a flusso incrociato trova applicazione negli impianti VMC anche per installazioni di piccole e medie dimensioni (appartamenti, piccole abitazioni mono o bi-famigliari). Il sistema è costituito da una unità di scambio termico, un bypass per il passaggio diretto, l'unità ventilante, come illustrato in figura 3.5.

L'applicazione del recuperatore all'impianto prevede la realizzazione di una linea di immissione una di estrazione che devono avere una geometria tale da convogliare i rami principali nello stesso punto, in corrispondenza della macchina, come illustrato in modo esemplificativo nella figura 3.6.

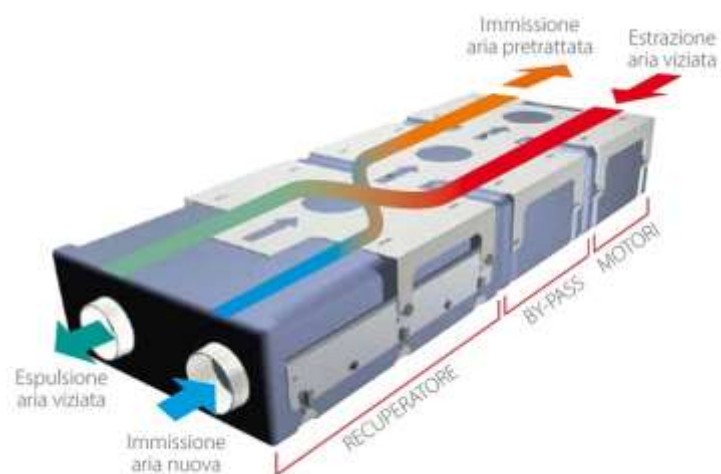


Fig. 3.5 – Schema recuperatore termico

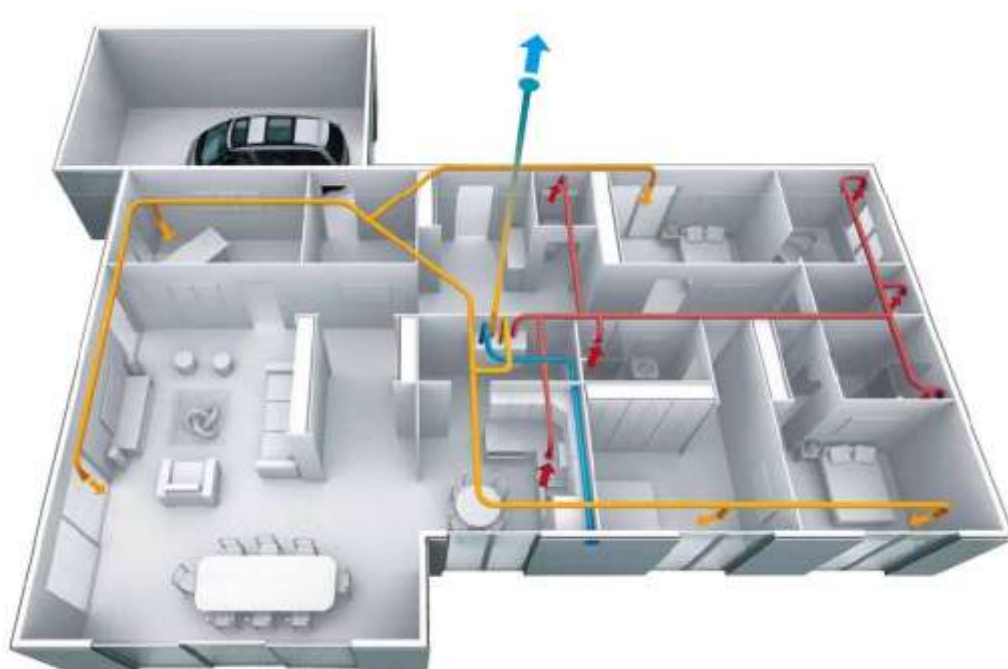


Fig. 3.6 – Schema impianto immissione/estrazione con recuperatore termico

3.3.2 Recuperatore a batterie accoppiate

Il recuperatore di calore è caratterizzato da scambiatori aria/acqua (a batterie alettate) installati sui canali d'aria di mandata e ripresa e collegati idraulicamente ad un unico circuito, contenente acqua, acqua glicolata o fluido diatermico e dotato di proprio circolatore. La trasmissione del calore avviene per conduzione e convezione sulle batterie, privilegiando l'apporto del calore sensibile, mentre il calore latente può essere recuperato se trasformato in calore sensibile in base alle caratteristiche di funzionamento rispetto al punto di rugiada dei fluidi.

Uno schema funzionale dell'impianto è rappresentato in figura 3.7.

I materiali impiegati prevalentemente sono rame per le tubazioni e alluminio per le alette di scambio nelle batterie ma in casi particolari possono essere utilizzati materiali con elevata resistenza a corrosione se vi è presenza di sostanze chimicamente aggressive diluite all'aria.

Questa tipologia di recuperatori ha una particolare flessibilità di impiego per i seguenti motivi:

- Possibilità di recuperare calore da fluidi su circuiti anche distanti tra loro, senza necessità di avvicinare la presa d'aria di immissione e quella di espulsione all'esterno
- Possibilità di recuperare calore da canali o condotti contenenti fluidi con presenza di inquinanti per trasferirlo a canali di aria pulita (o pura), particolarmente indicato per applicazioni industriali.
- Eliminazione totale del rischio di contaminazione dei fluidi per miscelazione, aspetto che rende questo sistema particolarmente adatto per applicazioni in cui sono richiesti standard molto severi di purezza (ospedali, camere bianche, laboratori)

A fronte dei vantaggi di utilizzo occorre riscontrare che il rendimento complessivo è penalizzato dalle successive fasi di scambio termico e dalla presenza del circuito del fluido intermedio con le relative dispersioni. La presenza della pompa di circolazione comporta consumi elettrici che incidono sulla valutazione dell'efficienza energetica totale e per il funzionamento sono necessari altri dispositivi ausiliari: vaso di espansione, valvola miscelatrice a tre vie per la regolazione del recupero termico comandata da un termostato, sistema di drenaggio delle condense.

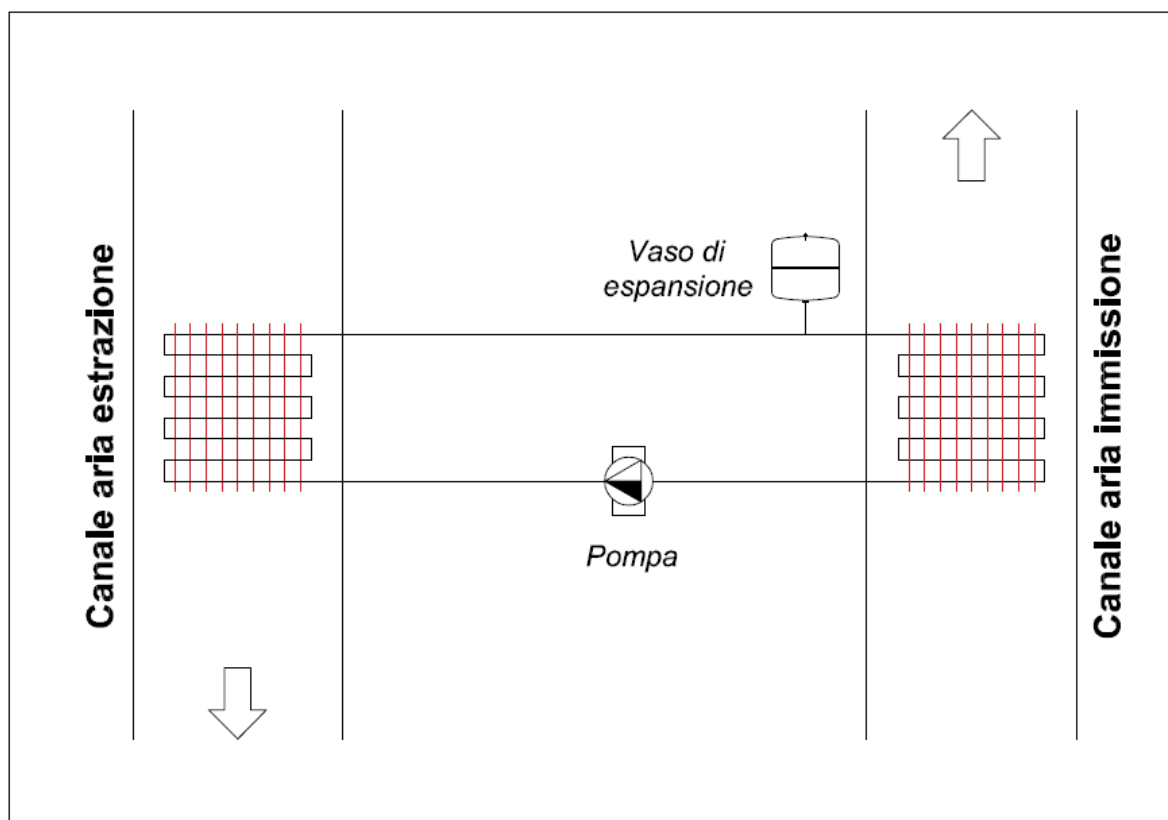


Fig. 3.7 – Schema impianto recuperatore a batterie con pompa

3.3.3 Recuperatore rotativo

Gli scambiatori rotativi sono costituiti da un cilindro rotante realizzato in materiale poroso con un elevato sviluppo superficiale per unità di volume, per ottimizzare lo scambio termico. Il cilindro è posizionato in modo tale da intercettare il condotto dell'aria di estrazione e dell'aria di immissione da e verso l'ambiente trattato. La velocità di rotazione è indotta da un motore elettrico e da un sistema di trasmissione meccanica dedicato.

I principali materiali di costruzione sono acciaio e alluminio per il telaio, le pannellature di contenimento e la struttura del rotore. Lo scambiatore è realizzato in metallo, matrice minerale, ceramica o materiale sintetico in funzione di:

- Tipologia dei flussi trattati
- Caratteristiche chimiche (aggressività sui materiali) dei composti diluiti in aria, in particolare in ambito industriale

- Temperature dei fluidi
- Caratteristiche dello scambio termico (calore sensibile, calore latente). Per ottimizzare lo scambio termico totale si adottano rivestimenti con elevate qualità igroscopiche, aumentando ad esempio la porosità dei setti

In figura 3.8 è riportato uno schema di funzionamento di uno scambiatore a recupero di tipo rotativo.

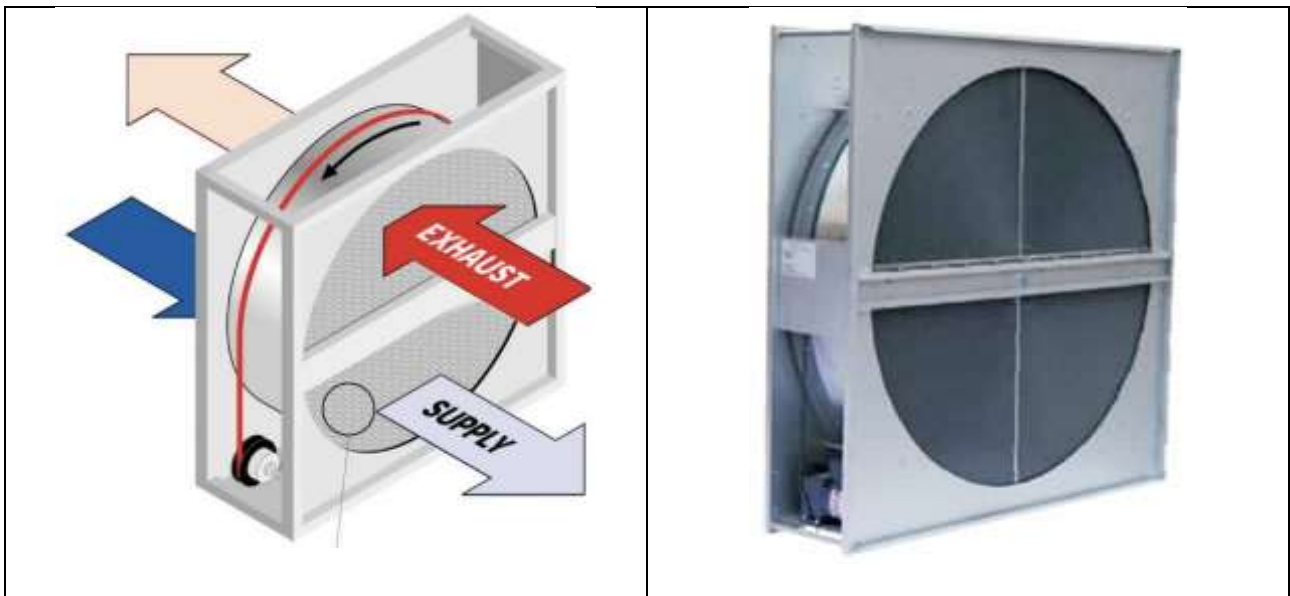


Fig. 3.8 – Schema funzionale e esempio di recuperatore rotativo

Ciascuno dei due semicerchi della matrice del rotore è sempre a contatto con uno dei due flussi di aria (uscente e entrante) e svolge la funzione di accumulatore termico trasportando quantità di energia, grazie alla rotazione del cilindro, da un flusso all'altro. Oltre allo scambio termico, i recuperatori rotativi consentono il trasferimento di umidità dall'aria estratta a quella immessa, riducendo o eliminando il fabbisogno di umidificazione artificiale all'interno degli ambienti.

La regolazione può avvenire mediante un sistema di serrande di by-pass sull'aria di rinnovo immessa oppure agendo sulla velocità di rotazione del cilindro (con motore a giri variabili con inverter): in questo caso, considerando che all'aumento di velocità corrisponde un incremento del calore recuperato, generalmente si imposta la velocità in funzione del valore desiderato di temperatura interna.

Nonostante l'apparecchio sia tecnologicamente semplice, la manutenzione richiede non soltanto la pulizia dello scambiatore ma anche la verifica del corretto funzionamento delle parti elettromeccaniche in movimento e del sistema di distribuzione del moto (cinghie, pulegge).

Questa tecnologia è caratterizzata da una elevata efficienza grazie alla grande superficie di scambio (da 300 a 3000 m² di superficie per ogni metro cubo di volume del rotore) e grazie alla possibilità di recupero dell'umidità da reimmettere in ambiente, riducendo i costi energetici ed economici di gestione. Tuttavia è applicabile solo nelle situazioni in cui sia possibile la contaminazione tra i due flussi di aria, elemento necessario per consentire lo scambio termico.

3.3.4 Recupero termico con pompe di calore

La pompa di calore può trovare una simbiosi funzionale con impianti di ventilazione, in primo luogo sfruttando il calore residuo dai condotti di estrazione per alimentare il flusso all'evaporatore. In questa modalità si ottimizza l'efficienza del sistema e si può riconvertire l'energia in fluidi termovettori, tipicamente acqua per la produzione di acqua calda sanitaria o aria per la climatizzazione degli ambienti.

Normalmente si utilizzano tre configurazioni:

1. Sistema aria/acqua per il preriscaldamento dell'acqua calda sanitaria e per alimentare impianti di riscaldamento ad acqua, preferibilmente a bassa temperatura
2. Sistema combinato aria/acqua e aria/aria per impianti misti con produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento ad aria di ambienti
3. Sistema aria/aria per implementare un recuperatore di calore con scambiatore aria/aria.

E' possibile adottare soluzioni con pompa di calore integrata da recuperatore che prevedono la collocazione dell'evaporatore della pompa di calore in corrispondenza del canale d'aria di estrazione e la collocazione del condensatore (unità interna) sul canale di immissione dell'aria in ambiente.

Il principio di base per l'impiego di pompe di calore nel recupero termico consiste nell'estrazione di calore dal flusso uscente e conversione in energia termica trasferita al flusso entrante con elevati rendimenti. Per questo motivo questo sistema è definito "recuperatore attivo" o anche "recuperatore termodinamico", proprio perché sfrutta un ciclo termodinamico.

Il sistema a recupero con pompa di calore risulta essere uno dei più efficienti, grazie all'utilizzo di fluido a temperatura più elevata alla sorgente fredda. Generalmente questa soluzione impiantistica è utilizzata nei Paesi con clima rigido (nord Europa, Canada) in cui il recupero termico dalla ventilazione è determinante per garantire una buona efficienza della pompa di calore, situazione difficilmente raggiungibile in presenza di basse temperature esterne.

Questo sistema può essere utilizzato sia nella stagione invernale sia nella stagione estiva, invertendo il circuito dell'aria tra immissione ed estrazione sulle due unità della pompa di calore. L'applicazione in edifici adeguatamente coibentati e con buona tenuta all'aria può rappresentare una valida soluzione per il recupero energetico, in particolare se il sistema viene ottimizzato da una regolazione puntuale per la ventilazione dei singoli locali, in funzione dell'occupazione e dell'effettivo fabbisogno energetico.

In figura 3.9 sono illustrati gli schemi di funzionamento di un sistema a recupero con pompa di calore nella configurazione invernale ed estiva.

Il sistema a pompa di calore può essere adattabile con una buona flessibilità a un ampio campo di applicazioni, grazie a diverse configurazioni impiantistiche come descritto di seguito:

- a) Unità esterna percorsa da totale flusso di aria esterna, unità interna percorsa da flusso di aria interna in estrazione, per il conseguimento del massimo livello di efficienza (caratteristico delle abitazioni)
- b) Sistema con ricircolo parziale in cui sull'unità interna viene ricircolata una parte dell'aria ambiente insieme all'aria immessa di rinnovo, e analogamente per l'unità esterna, impiegato ove sia necessario incrementare la potenza termica erogata mediante il flusso d'aria (caratteristico dei centri commerciali, uffici, locali pubblici).
- c) Sistemi con ricircolo variabile (implementazione del punto b) per una maggiore adattabilità alle caratteristiche dell'utenza a seconda che sia necessario ottimizzare la potenza erogata (tutto ricircolo), la ventilazione con recupero termico (ricircolo nullo), oppure individuare un punto di funzionamento intermedio (adeguato compromesso).

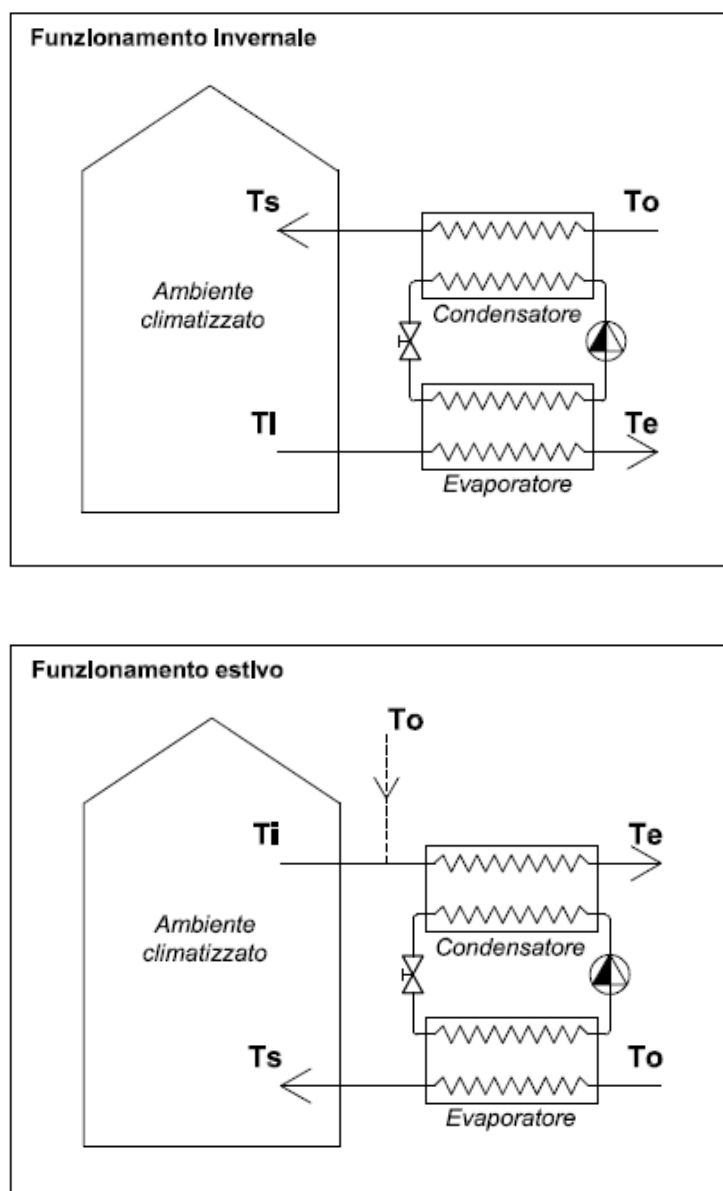


Fig. 3.9 – Schema funzionale pompa di calore a recupero (invernale/estivo)

Nella tabella 3.1 sono confrontati i principali elementi caratteristici dei sistemi di recupero termico analizzati.

<i>Tipologia</i>	<i>Applicazioni</i>	<i>Pregi del sistema</i>	<i>Svantaggi</i>
1. Recuperatore statico aria/aria	Civili abitazioni Terziario Industria	• Flussi non comunicanti • Assenza di contaminazioni • Flessibilità di utilizzo • Elevata efficienza • Ridotte cadute di pressione	• Prestazioni limitate per lo scambio di calore latente
2. Recuperatore a batterie con pompa di circolazione	Ambienti a rischio contaminazione (ospedali, sale operatorie, laboratori, camere bianche)	• Flessibilità di applicazione • Connessione tra circuiti distanti tra loro • Assenza di pericolo di contaminazione	• Ridotto rendimento per dispersioni sul circuito intermedio e presenza di dispositivi ausiliari
3. Recuperatori rotativi	Terziario Commerciale	• Rese elevate • Recupero del vapore d'acqua per umidificazione • Trasferimento calore latente • Cadute di pressione limitate	• Contaminazione tra i due fluidi • Presenza di motore e distribuzione meccanica (manutenzione)
4. Recuperatori con pompe di calore	Civile abitazione Terziario, commercio (piccole e medie dimensioni)	• Flessibilità di impiego • Funzionamento invernale ed estivo • Elevata efficienza	• Costi di investimento relativamente elevati • Manutenzione non trascurabile • Tempi di ritorno dell'investimento elevati

Tab. 3.1 – Confronto tra sistemi a recupero termico

3.4 Efficienza di ventilazione

Il ricambio dell'aria è un aspetto di grande importanza nella progettazione e gestione degli edifici e può essere analizzato in modo oggettivo da una serie piuttosto ampia di fattori e parametri anche complessi. Infatti nella maggior parte delle situazioni, pur conoscendo i valori previsti dalle norme per il corretto ricambio dell'aria, per una efficace ventilazione e per le soglie di tolleranza degli inquinanti diluiti nell'aria, non sono noti i corrispondenti valori reali quali ad esempio: la portata effettiva di ricircolo, la qualità del "lavaggio" degli ambienti trattati (efficienza di ventilazione), i quantitativi reali di contaminanti presenti e i loro effetti.

L'efficienza di ventilazione rappresenta l'efficienza con cui l'aria immessa riesce a rimuovere l'inquinante dall'ambiente e diminuisce quando l'aria in uscita ha una concentrazione di contaminanti

inferiore a quella dell'aria ambiente, situazione che denota il fatto che l'aria immessa ha by-passato la zona inquinata.

L'efficienza di ventilazione è un parametro determinante per verificare quanto il sistema sia in grado di effettuare un buon ricambio dell'aria ed esprime la correlazione tra la concentrazione degli inquinanti nell'aria immessa, quella espulsa e quella nella zona occupata, in particolare nel volume in prossimità del quale avviene la respirazione da parte degli occupanti.

La normativa che definisce l'efficienza di ventilazione è la già citata UNI EN 15251:2008.

Con riferimento alla configurazione illustrata in figura 3.10 l'efficienza di ventilazione (ε_v) si calcola come:

$$\varepsilon_v = \frac{C_{exh} - C_b}{\langle C \rangle - C_b} \quad (3.3)$$

dove: C_{exh} : concentrazione di inquinanti in estrazione

C_b : concentrazione inquinanti in *back-ground* (esterno)

$\langle C \rangle$: concentrazione media nello spazio interno

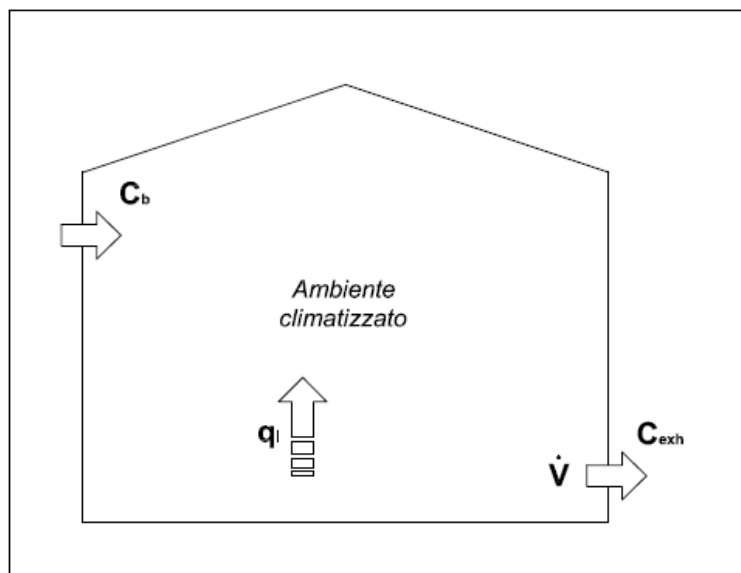


Fig. 3.10 – Schema per calcolo del bilancio di un contaminante in ambiente confinato

Si assume un valore di efficienza pari a 1 per definizione quando si ha una completa miscelazione dei contaminanti. Si assume un valore di efficienza pari a 2 per definizione quando si ha una completa rimozione dei contaminanti.

L'efficienza di ventilazione comprende due aspetti che vengono quantificati mediante appositi indici che servono per identificare la qualità dell'impianto:

1. Efficienza nel ricambio dell'aria all'interno dell'ambiente, basato sul concetto di "età dell'aria"
2. Efficacia nella rimozione degli inquinanti, basata invece sul concetto di distribuzione della concentrazione di inquinante in ambiente.

L'efficienza media del ricambio dell'aria (ε^a) si calcola come il rapporto tra l'età media dell'aria nel punto di espulsione (τ_n) e il tempo medio reale di ricambio dell'aria (τ_r), come indicato nella (3.4). Il primo parametro dipende dal volume dell'ambiente (V) e dalla portata di ventilazione (q_v), mentre il secondo dipende, oltre che dal volume e dalla portata d'aria, anche dalle caratteristiche geometriche del locale, dalla disposizione di ostacoli interni al flusso, dalla temperatura, dalla disposizione delle bocchette, dalla posizione delle sorgenti di calore. Il tempo medio reale è determinato per via sperimentale con misurazioni in campo.

$$\varepsilon^a = \frac{\tau_n}{\tau_r} \quad \text{con} \quad \tau_n = \frac{V}{q_v} \quad (3.4)$$

Nella tabella 3.2 sono indicati alcuni valori indicativi di efficienza media del ricambio dell'aria in relazione alla tipologia del sistema di distribuzione.

Tipologia distribuzione	Efficienza media (ε^a)
Completa e perfetta miscelazione	50%
Flusso a pistone (unidirezionale)	100%
Dislocamento	50% - 100%
Corto circuito	< 50%

Tab. 3.2 – Efficienza media ricambio aria [15]

L'efficacia nella rimozione degli inquinanti (ε^c) si calcola come rapporto tra la concentrazione di inquinante nell'aria espulsa (C_e) e la concentrazione media nell'aria ambiente (C), come indicato nella formula (3.5).

$$\varepsilon^c = \frac{C_e}{C} \quad (3.5)$$

I fattori che influenzano questo parametro sono: tasso di produzione e distribuzione in ambiente dei contaminanti, portata di aria di ricambio, movimentazione dell'aria in ambiente,

temperatura dell'aria di rinnovo e posizione dei diffusori, densità della sostanza inquinante diluita, posizione di corpi scaldanti nel locale. La presenza di zone di stagnazione determina localmente una maggiore concentrazione di inquinanti e come conseguenza una riduzione dell'efficienza di ventilazione.

Il valore dell'efficienza di ventilazione può essere determinato in base a misurazioni reali sul caso particolare generalmente basate sul metodo dei gas traccianti oppure, soprattutto per le esigenze di progettazione, viene calcolato mediante l'impiego di metodi computazionali applicati alla fluidodinamica sempre più diffusi. Come già più volte indicato, l'assenza di un sistema di ventilazione, o la presenza di infiltrazioni significative non consente una valutazione accurata dell'efficienza di ventilazione perché le variabili utilizzate assumono carattere di aleatorietà troppo ampio.

Nella tabella 3.3 sono riportati i valori indicativi dell'efficienza di ventilazione in funzione della differenza di temperatura tra aria immessa e aria ambiente in tre tipologie di configurazioni di distribuzione.

La correlazione tra la concentrazione di inquinanti e l'efficienza di ventilazione può essere determinata introducendo l'efficienza di ventilazione dalla (3.3) nell'equazione per il calcolo del bilancio di massa degli inquinanti indicata nella (3.6) ottenendo un'equazione per il calcolo della concentrazione a regime stazionario, indicata nella formula (3.7).

$$q_i + \dot{V} \cdot C_b - \dot{V} \cdot C_{exh} = V \cdot \frac{d\langle C \rangle}{dt} \quad (3.6)$$

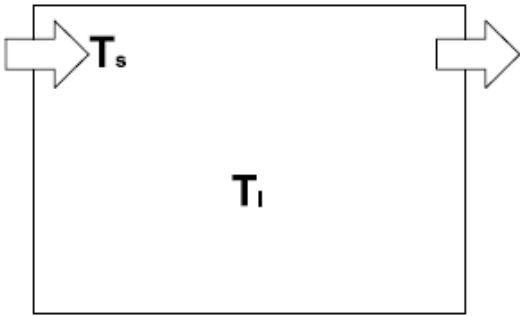
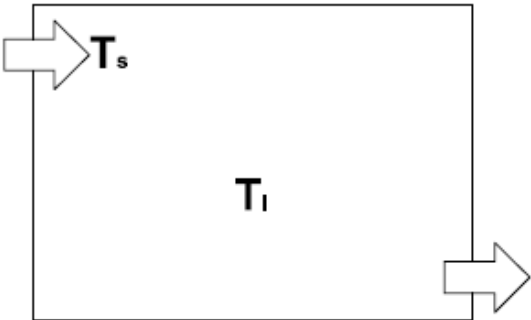
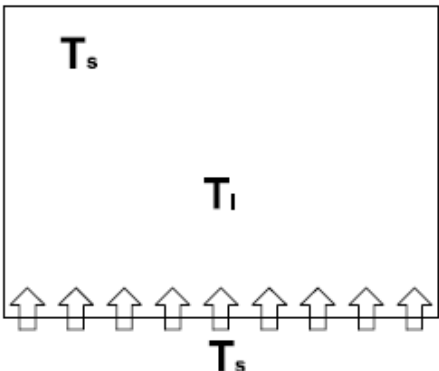
$$\langle C \rangle = C_b + \frac{q_i}{\varepsilon_v \cdot n \cdot V} \quad (3.7)$$

in cui n è il numero di ricambi d'aria e V è il volume dell'ambiente.

A partire dalla formulazione differenziale della (3.4), si ricava l'espressione valida per il calcolo della concentrazione in regime transitorio (funzione del tempo t), indicata nella (3.8).

$$\langle C \rangle = C_b + \frac{q_i}{\varepsilon_v \cdot n \cdot V} + \left(\langle C_0 \rangle - C_b - \frac{q_i}{\varepsilon_v \cdot n \cdot V} \right) \cdot e^{-\varepsilon_v n t} \quad (3.8)$$

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 pre-determinato dell'efficienza di ventilazione o viceversa.

	Tipologia di immissione	$T_s - T_i$	Efficienza (ϵ_v)
MISCELAZIONE		$< 0^\circ \text{C}$ $0.0 - 2.0^\circ \text{C}$ $2.0 - 5.0^\circ \text{C}$ $> 5^\circ \text{C}$	$0.9 - 1.0$ 0.9 0.8 $0.4 - 0.7$
MISCELAZIONE		$< -5^\circ \text{C}$ $-5 - 0^\circ \text{C}$ $> 0^\circ \text{C}$	0.9 $0.8 - 1.0$ 1.0
DISCLOCAMENTO		$< 0^\circ \text{C}$ $0 - 2^\circ \text{C}$ $> 2^\circ \text{C}$	$1.2 - 1.4$ $0.7 - 0.9$ $0.2 - 0.7$

Tab. 3.3 – Efficienza di ventilazione rispetto a temperature e distribuzione aria

Di seguito si riporta un esempio di calcolo per la simulazione della variazione di concentrazione di CO_2 in un ambiente con caratteristiche simili a quelle di una tipica classe di scuola. I dati di riferimento sono:

- Volume del locale: 200 m^3
- Numero persone: 20
- Produzione pro-capite di CO_2 : 20 l/h
- Concentrazione di back-ground: 400 ppm
- Concentrazione iniziale: 400 ppm

La simulazione prevede l'ingresso in classe delle persone al tempo $t=0$, con un tasso di ventilazione medio di 1 vol/h ($10 \text{ m}^3/\text{h}$ pro-capite). Questa condizione viene mantenuta per 1 ora fino al raggiungimento di un valore massimo. Successivamente si prevede l'uscita dalla classe con azzeramento della componente dovuta delle sorgenti endogene e un ricambio di aria che viene impostato a 2,5 volumi/ora per 20 minuti. E' stato ricavato il grafico illustrato in figura 3.11.

Dai risultati ottenuti è evidente l'incidenza dell'efficienza di ventilazione: nel caso specifico solo nel caso di efficienza superiore a 1 il volume trattato viene ricondotto a un livello di concentrazione di CO_2 inferiore al limite di soglia.

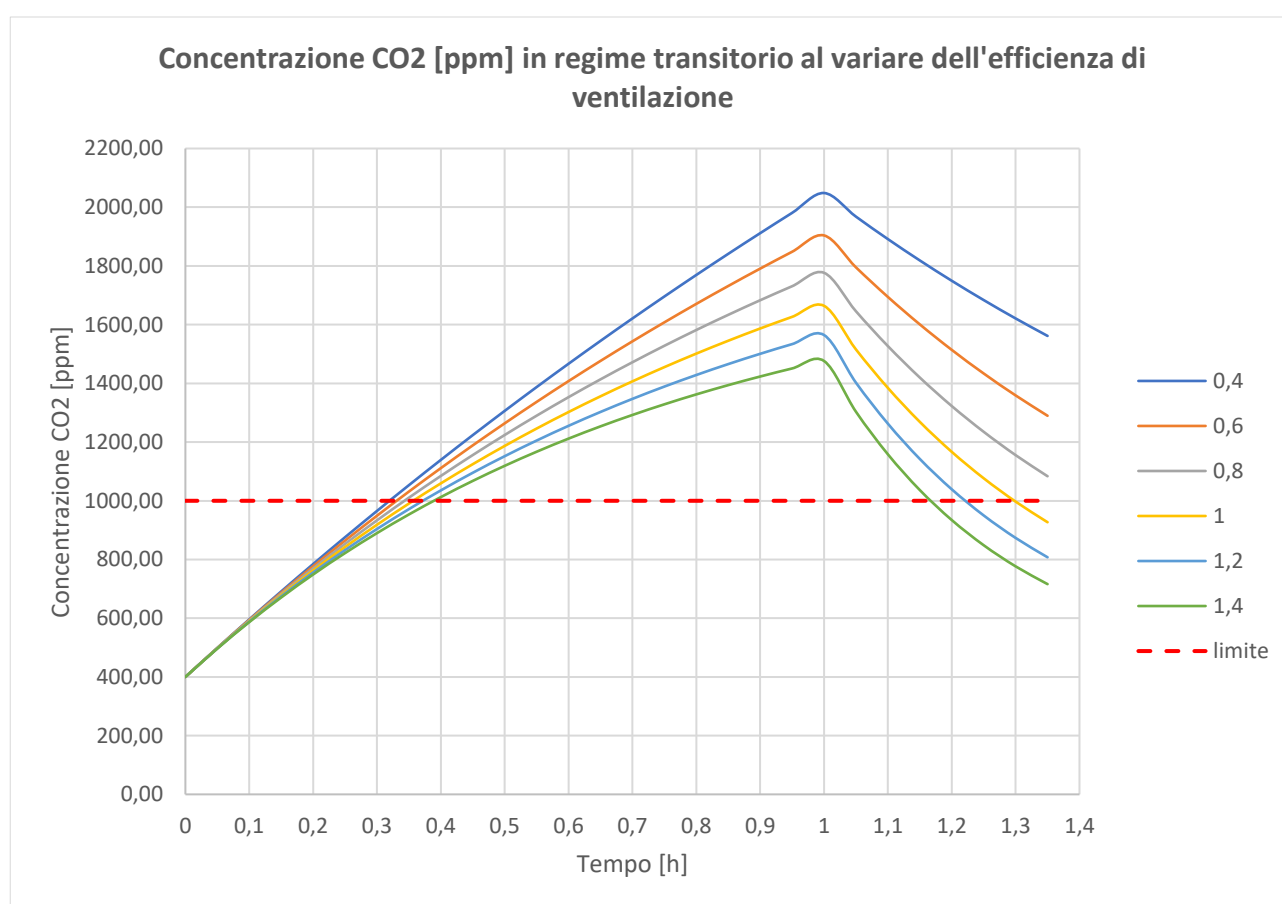


Fig. 3.11 – Andamento concentrazione in regime transitorio

A conclusione di questa parte di trattazione sull'efficienza energetica nella ventilazione si possono riassumere gli aspetti principali che concorrono a una ventilazione sostenibile:

- Ridurre la portata di aria utilizzando materiali, dispositivi e prodotti che abbiano un impatto minimo sul carico di inquinamento *indoor*

- Limitare il consumo di energia elettrica per la movimentazione dell'aria, diretta conseguenza della riduzione della portata ma anche dell'impiego di sistemi ad elevata efficienza e con buon livello di regolazione
- Garantire il ricambio d'aria necessario per raggiungere una buona qualità dell'aria interna, in funzione della domanda
- Individuare i parametri progettuali per conseguire una elevata efficienza di ventilazione
- Utilizzare prevalentemente il ricambio di aria (*free-cooling*) per il controllo dei carichi termici estivi, limitando il tempo di funzionamento di impianti di climatizzazione

4 IL PROGETTO DELL'IMPIANTO E LA MANUTENZIONE

La realizzazione di un progetto per l'installazione di un sistema di ventilazione meccanica controllata in un edificio deve tenere conto di alcuni elementi di base che sono determinanti al fine di scegliere la corretta impostazione impiantistica e per effettuare un corretto dimensionamento dell'impianto. In questa trattazione si considera in modo specifico la situazione di un edificio scolastico esistente (destinazione d'uso E.7 ai sensi del D.P.R. 412/93) con impianto termico ad acqua esistente, caratterizzato da corpi scaldanti del tipo a radiatori, in cui si vuole integrare un sistema di VMC per il controllo dell'aria.

La scelta della tipologia di edificio è dettata dall'esperienza in quanto la maggior parte degli edifici scolastici (a diversi livelli) non è provvista di sistemi di ventilazione meccanizzata mentre il contesto richiederebbe comunque di prestarvi grande attenzione per i seguenti motivi:

- Le aule in cui generalmente si svolgono le lezioni hanno una concentrazione elevata di persone per unità di volume, con un carico di contaminanti indoor piuttosto elevato
- Come conseguenza del punto precedente, il fabbisogno di portate d'aria di ricambio per garantire condizioni soddisfacenti di qualità dell'aria interna è elevato
- Il flusso importante di aria dall'esterno determina oltre ai carichi *indoor* un incremento della concentrazione di contaminanti provenienti dall'ambiente esterno, effetto che si può contrastare mediante opportuni sistemi di filtrazione
- Il flusso di aria di ricambio comporta un apporto significativo sul bilancio energetico dell'edificio, quindi si rende necessaria l'introduzione di recuperatori di calore come

descritto nel capitolo 3 ai fini del conseguimento di livelli accettabili di efficienza energetica.

4.1 Impostazione del progetto

I dati fondamentali per la progettazione dell'impianto si riferiscono ai requisiti per conseguire le corrette portate di ricambio dell'aria a seconda della tipologia d'uso e della dimensione dei locali. Occorre infatti considerare che in un ambiente scolastico vi sono diverse tipologie di ambienti, ciascuna con esigenze di ventilazione differenti, per la circolazione dell'aria, per il sistema di immissione ed estrazione, per le tempistiche di utilizzo e di funzionamento degli impianti. Si possono distinguere i seguenti casi:

- Aule per lezione frontale: sono caratterizzate da una densità occupazionale elevata e hanno un utilizzo continuativo da 4 fino a 7 ore con intervalli intermedi di assenza
- Aule per attività specifiche (laboratori): sono caratterizzati da un utilizzo non continuativo ma possono avere un maggiore carico di contaminanti endogeni rispetto ad aule tradizionali per la presenza di dispositivi in funzione (computer)
- Piccole aule o sale riunioni: generalmente caratterizzate da volumi ridotti sono utilizzate saltuariamente e possono subire una stagnazione degli agenti inquinanti, soprattutto se rimangono per lungo tempo con porte chiuse senza comunicare con gli altri ambienti
- Servizi: richiedono un tasso di ventilazione elevato ma generalmente riguardano volumi minimi rispetto all'edificio complessivo
- Corridoi, atri, pianerottoli: sono caratterizzati da una concentrazione elevata di presenza per brevi periodi nella giornata, possono essere soggetti a frequenti aperture verso l'esterno che limitano in termini di prestazioni e di efficacia gli effetti della ventilazione meccanica controllata
- Mensa: è solitamente caratterizzata da volumi importanti in cui la densità di occupanti è elevata e concentrata in determinati orari. Oltre al carico di contaminanti generato dalle persone occorre tenere conto della presenza di vapore d'acqua e di odori

- Cucine: l'ambiente dedicato alla preparazione dei pasti non viene preso in esame in questa trattazione in quanto la presenza di cappe aspiranti e prese d'aria esterna dirette necessarie per l'adempimento dei parametri imposti dalle norme di settore crea un micro-clima specifico. E' comunque importante garantire una separazione fisica tra le cucine e gli altri ambienti (porte a tenuta con meccanismo di auto-chiusura)

Il conseguimento di una buona efficienza del sistema richiede una corretta valutazione degli aspetti sopra indicati per la scelta delle macchine, per il dimensionamento delle linee di distribuzione e per il sistema di regolazione.

Il calcolo delle portate di aria per il semplice ricambio (senza considerare apporti al bilancio per la climatizzazione) tiene conto dei valori minimi di portate indicati nella norma UNI 10339 (riferimento al capitolo 1) e delle valutazioni secondo la teoria sviluppata da Fanger, basate ad esempio sulla valutazione della concentrazione di CO₂.

E' determinante la disposizione delle bocchette di immissione ed estrazione all'interno degli ambienti, onde evitare velocità dell'aria troppo elevate che inciderebbero negativamente sull'efficienza di ventilazione. Il sistema di immissione ed estrazione, così come le canalizzazioni di distribuzione, deve essere opportunamente progettato per potersi integrare in modo adeguato nell'architettura dell'edificio, senza compromettere l'accessibilità e la funzionalità per le ispezioni e la manutenzione (pulizia).

La regolazione dell'impianto è un aspetto di grande importanza e deve poter tenere conto di alcuni requisiti fondamentali per consentire il conseguimento di buoni risultati nella gestione:

- un buon livello di programmabilità da parte del personale tecnico incaricato della gestione dell'edificio
- una interfaccia semplice e comprensibile basata su centraline elettroniche con display contenenti i dati e le impostazioni fondamentali, tralasciando parametri di fine regolazione che spesso sono fonte di errori e impostazioni sbagliate
- presenza di sensori e attuatori per una adeguata regolazione automatica finalizzata all'ottimizzazione dei consumi energetici e della qualità dell'aria

Per una maggiore precisione nella progettazione dell'impianto è consigliato effettuare una prova di tenuta all'aria dell'edificio mediante il blower-door test. Prima di procedere alla realizzazione

di impianti VMC è necessario intervenire sulle caratteristiche dell'involucro affinché il *blower-door test* dia esito positivo.

4.2 Calcolo delle portate di aria

La portata di aria nominale di progetto deve essere valutata secondo la destinazione d'uso di ciascun ambiente adottando i criteri descritti ai paragrafi precedenti ed in particolare:

- Rispetto del valore minimo imposto dalla normativa (cfr. UNI 10339)
- Valutazione di una corretta ventilazione per la rimozione dei contaminanti prodotti in ambiente (teoria di Fanger), assumendo come criterio la produzione di CO₂, fattore peraltro facilmente misurabile ai fini di verifiche di collaudo
- Valutazione della efficienza di ventilazione.

Nel caso specifico, ipotizzando tipologie omogenee di locali caratteristici di un edificio scolastico, con le relative dimensioni indicative di riferimento, i requisiti minimi di ricambio dell'aria secondo la norma UNI 10339 sono indicati nella tabella 4.1.

	Tipologia locale	Superficie	Volume	Portata aria ricambio unitaria	Indice di affollamento	Portata aria su volume	Portata aria totale
		[m ²]	[m ³]	[l/s/pers.]	[pers/m ²]	[1/h]	[m ³ /h]
1	AULA	60	210	5	0,45	2,3	486
2	LABORATORIO	80	280	7	0,3	2,2	605
3	SALA INSEGNANTI	40	140	6	0,3	1,9	259
4	SERVIZI	15	52,5			8	420
5	MENSA	150	525	10	0,6	6,2	3240

Tab 4.1 – Ricambi d'aria in locali uso scolastico (UNI 10339)

Secondo la teoria sviluppata da Fanger il calcolo del ricambio dell'aria è determinato sulla base della qualità dell'aria considerando, ad esempio la concentrazione di CO₂, come descritto al punto 1.2.4 del presente elaborato. A tale proposito, ipotizzando trascurabile l'apporto di altre sorgenti indoor di CO₂, si considera una produzione pro-capite di CO₂ pari a circa 20 l/h e dal relativo diagramma, per il soddisfacimento delle condizioni limite indoor ($\Delta C = 600$ ppm), si ricava una portata d'aria di 10 l/s a persona (vd. Fig. 2.8).

Si ottengono così i risultati illustrati nella tabella 4.2.

	Tipologia locale	Superficie	Volume	Portata aria ricambio unitaria	Indice di affollamento stimato	Portata aria su volume	Portata aria totale
		[m ²]	[m ³]	[l/s/pers.]	[pers]	[1/h]	[m ³ /h]
1	AULA	60	210	10	25	4,3	900
2	LABORATORIO	80	280	10	25	3,2	900
3	SALA INSEGNANTI	40	140	10	10	2,6	360
4	SERVIZI	15	52,5	10	5	3,4	180
5	MENSA	150	525	10	90	6,2	3240

Tab 4.2 – Ricambi d'aria in locali uso scolastico (Fanger)

Il valore dell'efficienza di ventilazione si può stimare pari a 1 considerando i seguenti fattori, con riferimento alla tabella 3.3:

- immissione aria a parete verticale in posizione alta, in prossimità dello spigolo tra parete e soffitto
- estrazione aria a parete verticale, in posizione bassa a circa 15-20 cm dal pavimento, nel lato opposto a quello di immissione
- differenza di temperatura di immissione e temperatura ambiente di circa -3 °C (+/- 1°C)

Per definire le condizioni di progetto occorre tenere conto per ciascuna tipologia di locale del valore più cautelativo tra quelli indicati nella tabella 4.1 e nella tabella 4.2, ed in particolare quello con il numero di ricambi d'aria più elevato, come indicato nella tabella 4.3 e nel grafico corrispondente in figura 4.1.

	Tipologia locale	Portata aria totale	Portata aria su volume
		[m ³ /h]	[1/h]
1	AULA	900	4,3
2	LABORATORIO	900	3,2
3	SALA INSEGNANTI	360	2,6
4	SERVIZI	420	8,0
5	MENSA	3240	6,2

Tab 4.3 – Ricambi d'aria di progetto in locali uso scolastico

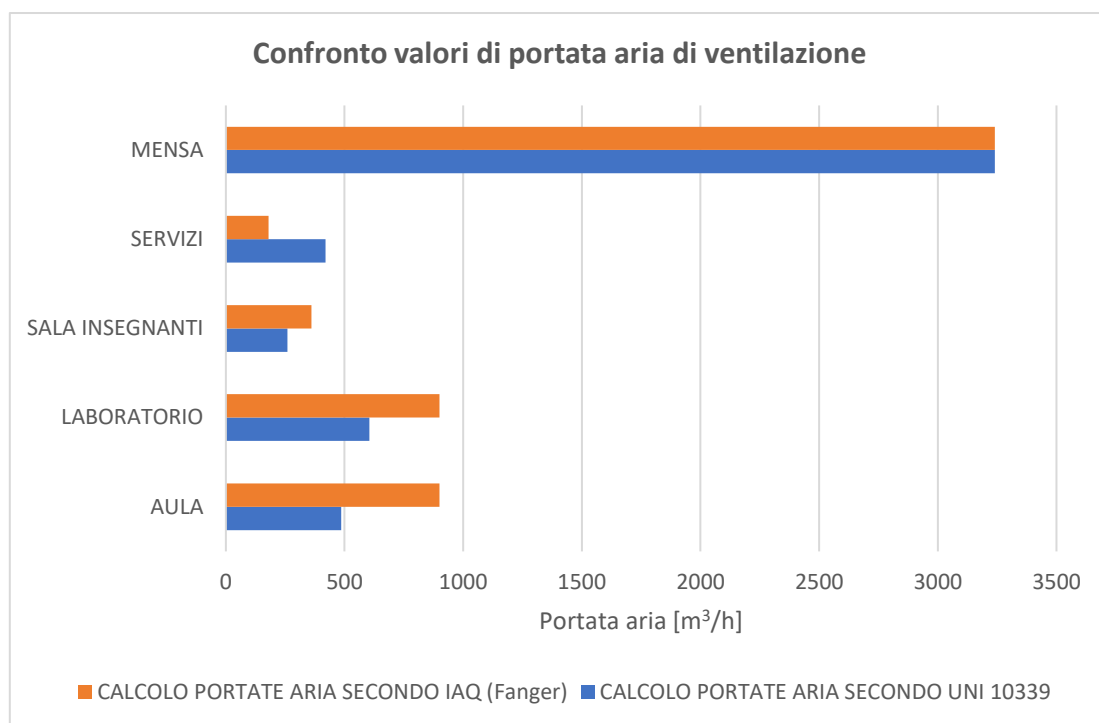


Fig. 4.1 – Ricambi d'aria di progetto in locali uso scolastico

In base a quanto esposto nel capitolo 3 paragrafo 4, considerando la correlazione tra la concentrazione di inquinanti e l'efficienza di ventilazione applicata ad un ambiente con le caratteristiche dell'aula di cui alle tabelle precedenti, ne deriva il grafico illustrato in figura 4.2, riferito ai seguenti dati:

- concentrazione iniziale: 400 ppm
- Concentrazione di back-ground: 400 ppm
- Volume dell'ambiente: 210 m³
- Efficienza di ventilazione: 1
- Produzione CO₂ pro-capite: 20 l/h/pers.
- Numero di persone: 25

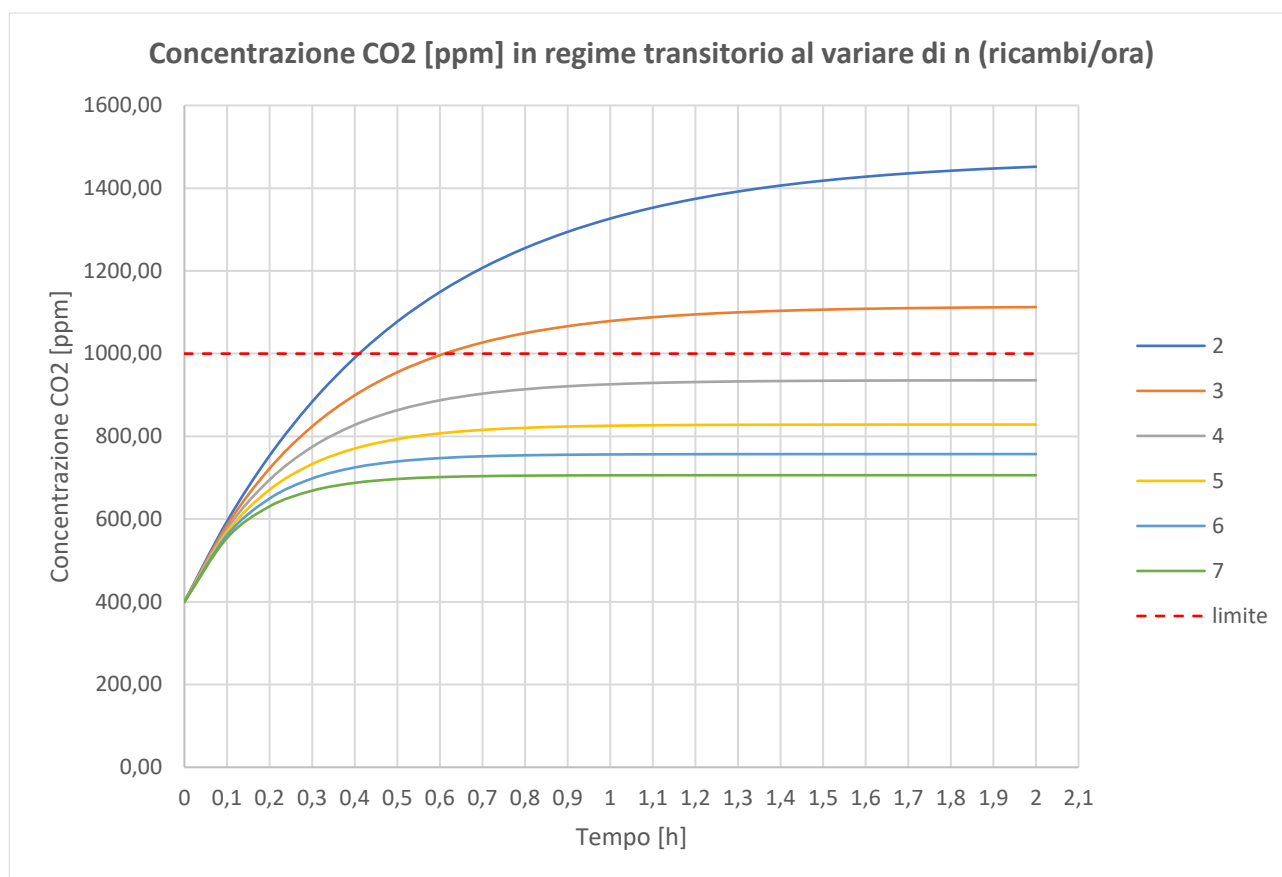


Fig. 4.2 – Variazione di C_{CO_2} al variare di n in regime transitorio

Fissato un valore di concentrazione di CO_2 di back-ground al pari del valore iniziale all'interno dell'aula di 400 ppm e un'efficienza di ventilazione pari a 1, risulta evidente che per conseguire un valore accettabile ai fini della qualità dell'aria, il numero di ricambi ora deve essere pari a circa 4 volumi/ora.

4.3 Verifica del carico termico

L'applicazione dei sistemi di ventilazione meccanica negli edifici esistenti che per destinazione d'uso richiedono un tasso elevato di ricambio d'aria, comporta una variazione significativa del bilancio termico nei singoli locali rispetto alla situazione con ventilazione naturale. Occorre quindi ricalcolare i parametri di temperatura e potenza termica per verificare se l'impianto esistente è

sufficiente a garantire le condizioni di progetto. Considerando edifici scolastici questo aspetto assume importanza in particolare nella stagione invernale.

Con riferimento all'equazione di bilancio termico già descritta nel capitolo 3 e riportata nella (4.1), la componente relativa alla ventilazione può essere scritta dettagliatamente nella forma indicata dalla (4.2), mentre il bilancio delle portate di aria è indicato nella (4.3).

$$Q_{cli} + Q_{tr} + Q_{ve} + Q_{gains} = 0 \quad (4.1)$$

$$Q_{ve} = W_{a,f} \cdot c \cdot t_e + W_{a,o} \cdot c \cdot t'_i + W_{a,v} \cdot c \cdot t_m - W_a \cdot c \cdot t_i^* \quad (4.2)$$

$$W_a = W_{a,f} + W_{a,o} + W_{a,v} \quad (4.3)$$

dove:

$W_{a,f}$: portata di aria dovuta alle infiltrazioni dall'esterno

$W_{a,o}$: portata di aria dovuta alle infiltrazioni da ambienti limitrofi

$W_{a,v}$: portata di aria dovuta ventilazione meccanica

W_a : portata di aria uscente

t_e : temperatura esterna

t'_i : temperatura ambienti limitrofi

t_m : temperatura di mandata impianto di ventilazione

t_i^* : temperatura ambiente interno

c : calore specifico dell'aria

Considerando un approccio semplificato che tiene conto delle seguenti ipotesi:

- Apporto delle infiltrazioni d'aria trascurabile per la presenza in particolare di serramenti con minima permeabilità all'aria
- Apporto delle infiltrazioni da locali limitrofi trascurabile in quanto la ventilazione meccanica prevista è a doppio flusso sui singoli locali

la (4.2) si può scrivere nella forma della (4.4) da cui, assumendo in prima approssimazione $W_a = W_{a,v}$ e considerando costante il valore di capacità termica dell'aria (c) si ottiene l'equazione (4.5).

$$Q_{ve} = W_{a,v} \cdot c \cdot t_m - W_a \cdot c \cdot t_i^* \quad (4.4)$$

$$Q_{ve} = W_a \cdot c \cdot (t_m - t_i^*) \quad (4.5)$$

Ai fini del calcolo occorre stimare la temperatura di mandata del sistema di ventilazione. Con l'utilizzo di scambiatori a recupero termico e in assenza di post-riscaldamento, la temperatura t_m è determinata dall'efficienza dello scambiatore e dalla differenza di temperatura tra l'ambiente esterno (variabile) e quella interna, generalmente costante, fissata a un determinato valore di *set-point* in condizioni estive o invernali.

A partire dall'equazione che caratterizza il rendimento dello scambiatore indicata in (4.6) e tenendo conto delle seguenti ipotesi:

- effetto dello scambio termico del calore latente trascurabile
- uguale valore di portata in massa dell'aria in ingresso e in uscita ($G_{in} = G_{out}$)
- capacità termica dell'aria $c_{p,a}$ costante nel campo di temperatura interessato

si ricava la temperatura di immissione del sistema di ventilazione t_m come indicato nella (4.7).

$$\eta = \frac{G_{in} \cdot \Delta h_{in}}{G_{out} \cdot \Delta h_{out}} = \frac{G_{in} \cdot c_{p,a} \cdot (t_m - t_e)}{G_{out} \cdot c_{p,a} \cdot (t_i^* - t_e)} = \frac{(t_m - t_e)}{(t_i^* - t_e)} \quad (4.6)$$

$$t_m = t_e + \eta \cdot (t_i^* - t_e) \quad (4.7)$$

La temperatura di immissione (t_m) si può quindi esprimere in funzione della temperatura esterna (t_e) al variare del rendimento dello scambiatore di calore, come indicato nel grafico di figura 4.3.

In alcune situazioni è preferibile ridurre la portata di estrazione per garantire una certa sovrappressione all'interno dei locali, per limitare il fenomeno delle infiltrazioni (incontrollate): la differenza tra le portate non deve superare indicativamente il valore del 10%, onde evitare effetti negativi sull'efficienza di ventilazione in quanto entrerebbero in gioco fattori quali le esfiltrazioni che non partecipano allo scambio termico.

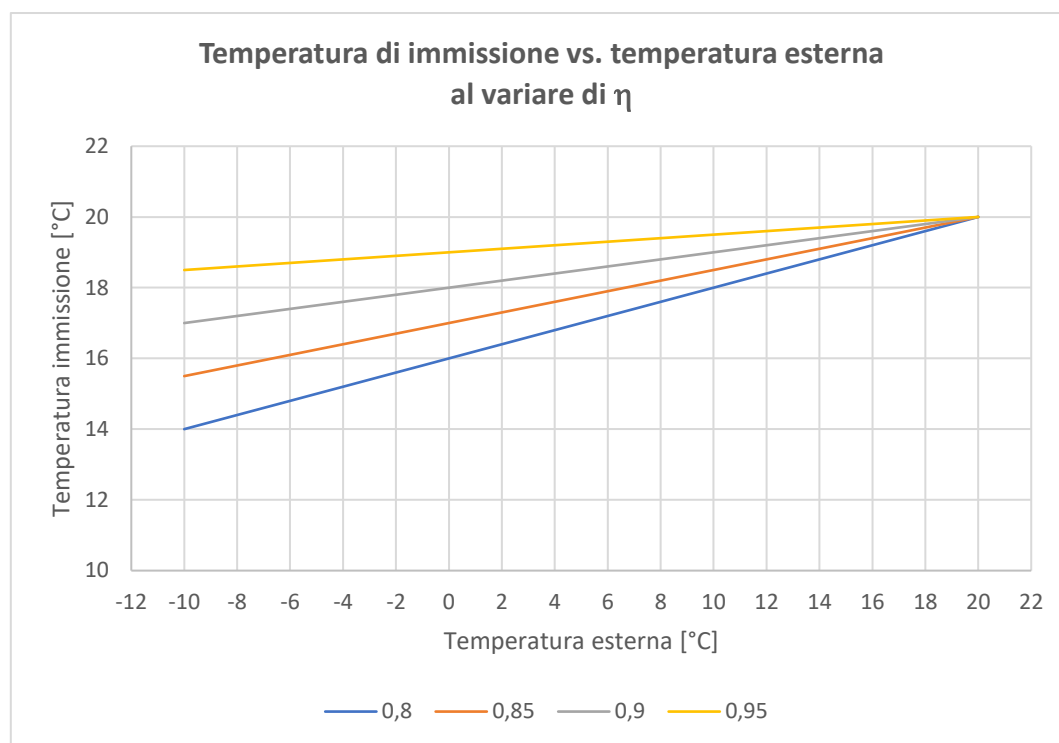


Fig. 4.3 – Temperatura di immissione con scambiatore a recupero termico

Ai fini progettuali occorre definire una condizione nominale per la verifica del bilancio termico, fissando ad esempio il valore di temperatura esterna di progetto come previsto dal D.P.R. 412/93. Si procede quindi alla verifica del corretto dimensionamento dell'impianto termico esistente analizzando in particolare la potenza utile resa dalla sommatoria dei corpi scaldanti presenti e le dispersioni termiche considerando la ventilazione meccanica.

In caso di verifica negativa occorre effettuare una scelta progettuale tra diverse soluzioni:

- Integrare i corpi scaldanti nel locale, se le condizioni al contorno lo consentono
- Ridurre la portata di aria di ricambio con una incidenza sulla qualità dell'aria entro certi intervalli di tolleranza e di accettabilità
- Ridurre la componente di trasmissione termica attraverso l'involucro a favore della ventilazione mediante interventi di coibentazione

In fase di progettazione sono disponibili programmi dedicati per consentire la valutazione delle condizioni nominali e per calcolare il fabbisogno energetico medio annuale simulando l'andamento del clima esterno sulla base dei dati previsti dalla normativa (metodo dei gradi-giorno o metodo dei "bin").

4.4 Il sistema di immissione ed estrazione dell'aria

Il sistema di immissione ed estrazione dell'aria in ambiente deve essere progettato tenendo conto principalmente dei seguenti aspetti:

- Caratteristiche geometriche del locale: dimensioni in pianta, altezza interna, presenza di volumi, morfologia (pianta rettangolare, a "L", a "T")
- Posizione di porte di ingresso e serramenti
- Disposizione delle bocchette per massimizzare efficienza di ventilazione
- Presenza di sorgenti di calore e relativo orientamento dei flussi d'aria
- Velocità dell'aria

Le aule di tipo scolastico, i laboratori, i locali destinati ad uso ufficio o a riunioni sono generalmente caratterizzate da una geometria regolare a base rettangolare o quadrata con altezze che variano intorno a una media tra i 3 e i 4 metri. Spesso vi sono serramenti che si sviluppano su dimensioni piuttosto ampie collocati su uno o due lati e generalmente nelle nicchie ricavate in corrispondenza dei sottofinestra sono posizionati i corpi scaldanti.

I limiti massimi per la velocità dell'aria in ambiente sono definiti dalla citata norma UNI 10339 oltre a prescrizioni che provengono da dati presenti in letteratura. Si considera un limite massimo di 0,10 m/s (UNI 10339 prospetto X), che trova riscontro con i parametri definiti secondo la teoria di Fanger per una resistenza termica di abbigliamento di 0,5 – 0,7 CLO e una attività fisica corrispondente a 1,2 – 1,5 MET (grafico figura 4.4).

Nelle aule, la soluzione prescelta per l'immissione dell'aria è la collocazione di bocchette alte a parete verticale (sfruttando l'effetto Coanda) con ripresa dell'aria di estrazione sempre a parete verticale, in basso e sul lato opposto all'immissione. Questa impostazione consente una buona efficienza di ventilazione (pari a 1) e non crea moti convettivi contrastanti con quelli generati dall'impianto di riscaldamento caratterizzato da radiatori in posizione sottofinestra. Nella figura 4.5 è illustrata una caratteristica bocchetta di immissione con alette regolabili sulle quattro direzioni.

Nel caso dei servizi e dei bagni è preferibile adottare bocchette per sola estrazione, onde evitare che via siano situazioni in cui gli odori possano fluire verso altri locali adiacenti a causa di temporanei sbilanciamenti dell'impianto (apertura o chiusura di porte verso l'esterno) che incidono sulle portate di aria. Quindi, essendo i bagni in comunicazione con i corridoi, si preferisce adottare un sistema per cui l'immissione dell'aria avvenga nei corridoi e l'estrazione nei bagni, adottando

accorgimenti tali per garantire la corretta circolazione (griglie di transfer sulle porte, aperture permanenti).

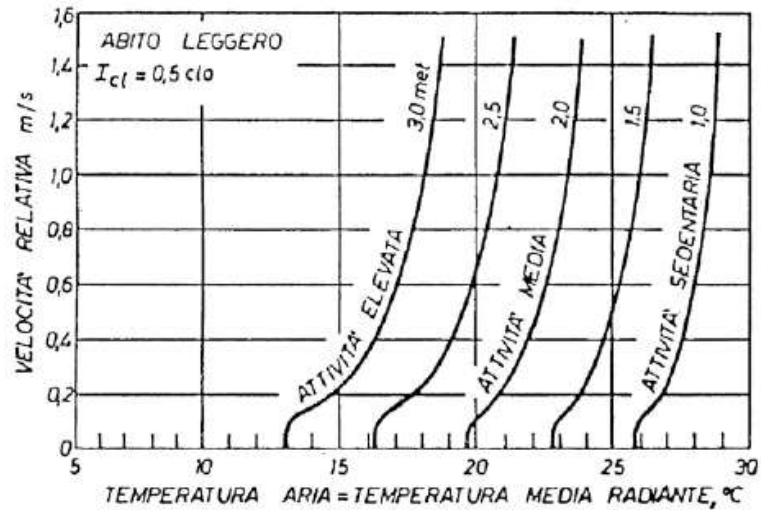


Fig. 4.4 – Correlazione tra temperatura media radiante e velocità dell'aria (Fanger)

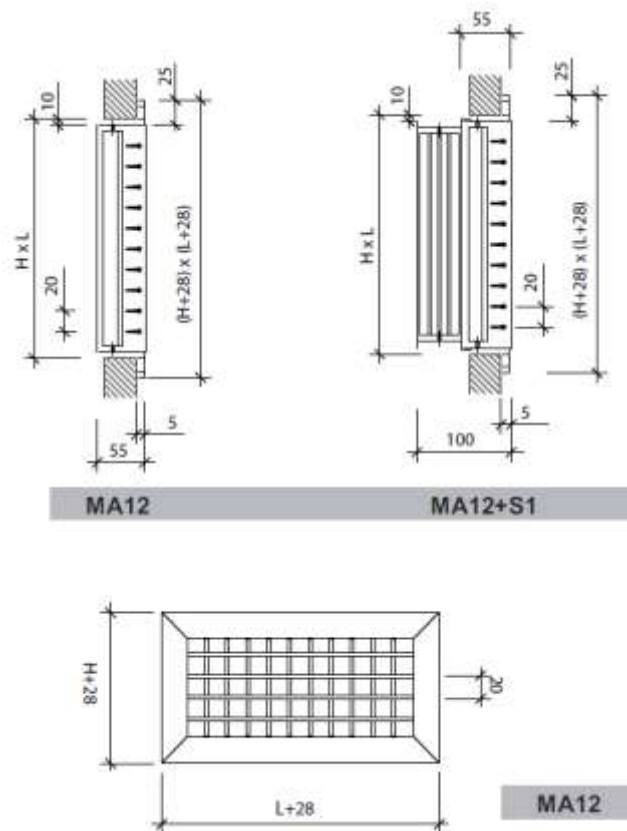


Fig. 4.5 – Tipologia di bocchetta per immissione aria con doppio ordine di alette regolabili (fonte AIR CAR)

Nei corridoi, per una migliore distribuzione del flusso dell'aria sulla lunghezza possono essere adottati canali microforati in lamiera zincata al posto delle tradizionali bocchette, riferimento alla figura 4.6.



Fig. 4.6 – Tipologia di canale aria microforato (fonte CTG)

4.5 Le macchine per il trattamento dell'aria

La scelta della macchina per il trattamento dell'aria può essere definita in base ad alcune alternative possibili:

1. **Installazione di una macchina per grandi portate a servizio di tutto l'edificio (centralizzato):** permette di ridurre i costi di gestione e di manutenzione ma richiede un sistema di distribuzione articolato con sezioni dei canali il cui ingombro non è facilmente compatibile con gli spazi disponibili, soprattutto in applicazioni su edifici esistenti che non prevedono importanti interventi sulla struttura dell'edificio. Presupponendo che i ventilatori a bordo dell'unità ventilante centrale siano azionati da motori con inverter, la regolazione dell'impianto in funzione del fabbisogno nei singoli locali è demandata interamente al sistema di distribuzione, agendo su serrande con servomotore installate lungo le principali derivazioni,. La macchina, completa della prima parte delle canalizzazioni, dei plenum ed eventuali accessori, in questo caso ha un ingombro significativo e deve essere posizionata in un apposito locale,

generalmente al piano terreno o seminterrato, nel vano sottotetto o, dove possibile, all'esterno in copertura, tenendo conto di garantire un agevole accesso per gli interventi di manutenzione.

2. **Installazione di macchine per portate medio/grandi con una ripartizione dell'edificio a macro-zone (semi-centralizzato):** questa soluzione prevede una ripartizione dei volumi da trattare scegliendo una configurazione orizzontale (per piano) o verticale (per blocco), con una maggiore flessibilità nell'applicazione a edifici esistenti. Infatti la distribuzione su più circuiti di andata e ripresa consente di ridurre gli ingombri rispetto ad un unico impianto centralizzato e quindi di ovviare ai problemi di integrazione architettonica. Per quanto riguarda la regolazione valgono considerazioni analoghe a quelle di cui al punto precedente. Pur riducendo le dimensioni, anche in questo caso le macchine devono trovare un alloggiamento in locali dedicati, o all'esterno, per esempio su coperture piane, se presenti.
3. **Installazione di più macchine per portate ridotte distribuite (localizzati):** in questo caso si installano più unità di recupero a servizio di singoli locali o di piccoli raggruppamenti di locali con destinazione d'uso e tipologia di impiego omogenee. Se da un lato la presenza di più unità richiede oneri di manutenzione maggiori, questa soluzione consente di gestire volumi climatizzati in modo più puntuale, con una migliore flessibilità anche nella regolazione dei carichi. Considerate le dimensioni ridotte delle unità si possono trovare nell'edificio zone per la collocazione in vani e locali accessori o anche in posizione intradosso soffitto con opportune rifiniture estetiche, rispettando in ogni caso la semplicità di accesso per la manutenzione. E' possibile raggruppare una o più aule con utilizzo continuativo oppure rendere indipendenti i laboratori, le sale riunioni, o aule ad utilizzo saltuario (sala musica, sala proiezioni). Considerata la possibilità di azionare le macchine con regolazioni individuali, anche in questo caso è necessario adottare ventilatori azionati da motori con inverter.

La scelta delle macchine incide fortemente sulla progettazione del sistema di distribuzione dell'aria che dovrà essere dimensionato di conseguenza.

A titolo di esempio nella tabella 4.4 si riportano alcune tipologie di macchine di marca AERMEC che possono essere adatte per dimensioni e caratteristiche all'impiego in edifici di tipo scolastico:

	Modello ERSR (7 taglie disponibili) Portata aria: da 1.100 a 16.100 m³/h Rendimento termico: da 79% a 78,7% Scambiatore: rotativo Potenza termica recuperata: da 5,8 a 85 kW Potenza el. Ventilatori: da 0,69 a 7,8 kW Controllo motore ventilatori: elettronico o inverter Pressione statica (mandata): da 360 a 1.500 Pa Pressione statica (ripresa): da 360 a 1.500 Pa Classe filtri mandata: D Classe filtri ripresa: D Pressione sonora: da 66 a 79 dB
	Modello RPF Portata aria: da 790 a 4.250 m³/h Rendimento termico: da 80% a 83,8% Scambiatore: alluminio a piastre (controcorrente) Potenza termica recuperata: da 4,2 a 22,8 kW Potenza el. Ventilatori: da 0,31 a 2,5 kW Controllo motore ventilatori: inverter Pressione statica (mandata): da 191 a 143 Pa Pressione statica (ripresa): da 196 a 184 Pa Classe filtri mandata: B Classe filtri ripresa: a richiesta del Committente
	Modello RPLI Portata aria: da 300 a 3.900 m³/h Rendimento termico: da 81,1% a 75,6% Scambiatore: alluminio a piastre (controcorrente) Potenza termica recuperata: da 1,6 a 19,7 kW Potenza el. Ventilatori: da 0,13 a 1,42 kW Controllo motore ventilatori: elettronico o inverter Pressione statica (mandata): da 323 a 196 Pa Pressione statica (ripresa): da 328 a 242 Pa Classe filtri mandata: F7 Classe filtri ripresa: M5 Pressione sonora: da 56 a 68 dB

Tab 4.4 – AERMEC: unità per VMC con recupero termico

4.6 Il sistema di distribuzione

Il sistema di distribuzione è articolato in base alla scelta della configurazione del numero e delle dimensioni delle unità di ventilazione adottate: si possono adottare i seguenti criteri a seconda della casistica descritta nel paragrafo 1.5:

1. **Impianti centralizzati:** occorre individuare lo spazio per le dorsali principali in senso verticale (dalla copertura a scendere verso i locali o viceversa dal piano terreno o seminterrato a salire) e in senso orizzontale per raggiungere i punti di derivazione per la distribuzione nei locali. Si possono quindi ricavare o sfruttare cavedi verticali esistenti con dimensioni piuttosto generose, e installazioni a vista dei canali per esempio a intradosso solaio nei corridoi. Tutti gli ingombri generati dall'impianto devono essere compatibili con l'architettura interna dell'edificio e in particolare con le dimensioni e distanze minime richieste ai fini urbanistici e per la sicurezza (in particolare nelle zone di transito e nelle vie di esodo)
2. **Impianti semi-centralizzati:** in questo caso valgono analoghe considerazioni di cui al punto precedente ma la ripartizione del carico su più unità consente di ridurre la sezione dei canali principali. Occorre sempre tenere in considerazione e valutare attentamente in sede progettuale le problematiche legate agli ingombri e alla formazione di opportuni fori di passaggio nella struttura
3. **Impianti locali:** le unità possono essere collocate in prossimità dei punti di immissione ed estrazione dell'aria nei locali serviti, riducendo notevolmente le sezioni e la lunghezza dei canali d'aria, elementi che incidono anche a favore di un minore impatto acustico e una minore prevalenza richiesta ai ventilatori.

I canali d'aria sono realizzati in lamiera zincata, preferibilmente con sezione circolare, utilizzando sezioni quadrate o rettangolari esclusivamente nei tratti in cui sia necessario adeguare gli ingombri agli spazi disponibili. I canali sono installati prevalentemente all'interno dei locali riscaldati, a vista o parzialmente protetti da strutture in cartongesso o laterizio quindi non è prevista coibentazione. Si prevede un rivestimento termo-isolante solo per le canalizzazioni collocate all'esterno o in locali non riscaldati.

E' opportuno adottare accorgimenti per l'attenuazione passiva delle emissioni acustiche dell'impianto mediante l'installazione di silenziatori e setti fonoassorbenti in corrispondenza dei

componenti dell'impianto che determinano sorgente di rumore (ventilatori, griglie, serrande, diffusori) tenendo conto che curve, plenum, condotti hanno una funzione fonoassorbente naturale. L'attenzione alle problematiche connesse al rumore è determinante in un ambiente di tipo scolastico e le possibili soluzioni sono da ricercare innanzitutto nel corretto posizionamento dell'unità di trattamento aria e nella geometria dei canali.

Altro problema analogo alla propagazione del rumore è generato dalle vibrazioni, dovute alla presenza di macchine e fluidi all'interno di condotti vincolati rigidamente alle strutture. Per attenuare l'effetto generato dalle vibrazioni possono essere utilizzati i seguenti sistemi:

1. Opportuni isolatori costituiti da materiali resilienti tra l'involucro delle unità ventilanti e l'elemento di ancoraggio a parete, basamento o soffitto (per macchine appese).
2. Eventuale adozione di zavorre (per unità di grandi dimensioni installate a terra) per limitare lo spostamento provocato dalle vibrazioni
3. Inserimento di giunti flessibili nei canali d'aria in corrispondenza del collegamento tra la macchina e i condotti principali
4. Impiego di tasselli, ganci e supporti antivibranti per l'ancoraggio dei canali alle strutture dell'edificio
5. Accorgimenti specifici in corrispondenza degli attraversamenti di pareti e solai.

Nel caso di impianti con necessità di regolazione lungo il sistema di distribuzione le serrande manuali o automatiche devono essere collocate in posizione tale da poter garantire un agevole accesso in caso di ispezione visiva e di manutenzione. La presenza di guasti o errato funzionamento della regolazione può generare condizioni ambientali insalubri o un incremento dei costi di gestione.

I canali di aspirazione ed emissione all'esterno devono essere posizionati in modo tale che gli effluenti estratti non vengano ricircolati nella bocchetta di aspirazione, pertanto è prevista una distanza minima tra le due bocchette, sia negli impianti localizzati sia negli impianti di tipo centralizzato o semi-centralizzato.

4.7 La regolazione e il controllo dell'impianto

L'impianto di ventilazione meccanica deve essere equipaggiato con un sistema di regolazione e di controllo che ne ottimizza il funzionamento secondo l'effettivo fabbisogno. Nel caso specifico l'unità non svolge funzioni di climatizzazione in riscaldamento o raffrescamento, quindi l'obiettivo principale è quello di garantire all'interno dei locali le corrette portate di aria di ricambio per contenere la concentrazione di inquinanti. Il grado di risparmio e di efficienza energetica dell'impianto dipende in modo significativo dalla capacità del sistema di regolazione di inseguire la variazione delle condizioni ambientali.

Nell'installazione in un edificio destinato ad uso scolastico occorre tenere conto di tre tipologie di regolazione e controllo, a seconda della tipologia di ambiente trattato.

- **Concentrazione inquinanti (CO₂):** per consentire la modulazione delle portate di aria secondo il numero di persone presenti e secondo l'attività svolta si utilizza un sensore di presenza di CO₂ agente in banda proporzionale sulla portata dell'aria di ricambio modulando la velocità del ventilatore o la parziale apertura della serranda di regolazione sul canale a servizio del singolo ambiente. Allo stato attuale la regolazione in funzione della CO₂ è uno dei metodi più efficienti per limitare i consumi energetici
- **Tempo di funzionamento:** in alcuni casi è possibile determinare a priori il periodo di occupazione di determinati ambienti, in modo da impostare il funzionamento della ventilazione (con o senza regolatore di portata) nelle fasce orarie richieste. Può essere applicato ad esempio alla ventilazione dei corridoi e dei vani di transito.
- **Temperatura ambiente:** la sonda di temperatura ambiente può essere utilizzata come sistema di controllo di secondo livello a valle del sistema a CO₂ o dell'orologio per verificare che le temperature interne non raggiungano livelli troppo bassi (inverno) o troppo elevati (estate). In questo caso il sistema deve essere in grado di fermare l'unità o commutarne il funzionamento.

4.8 La manutenzione

La manutenzione degli impianti di ventilazione è un aspetto fondamentale non solo per garantire la vita utile e l'efficienza del sistema, ma anche per evitare che le condizioni ambientali siano mantenute nei limiti previsti dalla normativa e per evitare in particolare che l'impianto possa generare e immettere negli ambienti serviti agenti inquinanti o batteri, e diventare esso stesso causa del problema per cui dovrebbe essere la soluzione.

Generalmente la ditta installatrice è contrattualmente tenuta a consegnare al Committente il "Piano di Manutenzione dell'Opera", che descrive le operazioni e le relative scadenze temporali necessarie a perseguire i seguenti obiettivi:

- il mantenimento dei livelli prestazionali dei prodotti e dei beni d'uso;
- il mantenimento in stato di efficienza dei prodotti e dei beni d'uso;
- la riparazione dei prodotti e dei beni d'uso in avaria;

La manutenzione può essere classificata secondo la tipologia e le programmazione degli interventi:

- **A guasto:** intervento a rilevamento di guasto per ripristinare la funzione originaria del sistema
- **Ciclica (o periodica):** serie di verifiche e interventi periodici, preventivi e programmati per garantire al sistema la corretta operatività funzionale e limitare il rischio di guasto o di fermo accidentale
- **Migliorativa:** azioni di implementazione e miglioramento del sistema per la prevenzione di guasti, da svolgersi anche in base al rilevamento dati, monitoraggio di parametri e diagnostica del sistema
- **Ordinaria (rif. D.P.R. 412/93):** interventi previsti nei libretti di uso e manutenzione degli apparecchi che richiedono l'impiego di materiali di consumo ordinari, ad esempio: lubrificazione di parti meccaniche, pulizia di condotti e scambiatori, verifica di serraggi di viti e bulloni.
- **Straordinaria (rif. D.P.R. 412/93):** in caso di anomalie o di guasto prevede interventi di riparazione, sostituzione e revisione di componenti o di parti dell'impianto affinché il sistema sia ricondotto al funzionamento previsto dal progetto. Sono interventi di

manutenzione straordinaria anche quelli necessari per l'adeguamento normativo degli impianti.

Considerando la tipologia specifica dell'impianto di ventilazione con recupero termico si prevedono principalmente gli interventi indicati in tabella 4.6.

Gruppo ventilante	• Ingrassaggio dei cuscinetti • verifica di rumorosità e di vibrazioni anomale, sintomo di disallineamento o eccessivo sporcamento delle parti rotanti • Verifica dello stato e della tensione delle cinghie di trasmissione • Verifica dello stato di pulegge e cuscinetti tendicinghia
Involucro dell'unità	• Pulizia dell'involucro e dei vani interni all'unità • Igienizzazione con prodotti per la rimozione di eventuali batteri • Verifica dello stato di conservazione del materiale isolante, soprattutto sui lati interni alla macchina
Scambiatore a recupero	• Pulizia della batteria con aria compressa • Prova in pressione dei circuiti per verificare presenza di fessurazioni
Filtri	• Sostituzione periodica dei filtri a perdere • Pulizia con getto d'acqua o aria compressa (a seconda delle tipologie) • Verifica delle tenute onde evitare trafilamenti • Tempistiche di pulizia e sostituzione previste dal costruttore
Canali distribuzione	• Verifica visiva periodica per mezzo di video-ispezione in tratti a campione • Verifica biologica per individuare presenza di colonie di batteri (Legionella) • Pulizia canali aria mediante aria compressa, aspirazione sottovuoto, spazzole rotanti con dispositivo di aspirazione e rimozione dei residui • Igienizzazione dell'impianto mediante prodotti nebulizzati e lavaggio totale dell'impianto con edificio vuoto
Impianto elettrico	• Verifica periodica del funzionamento dei dispositivi di alimentazione, degli interruttori, dei dispositivi di protezione ai quadri e sulle singole macchine • Verifica periodica dello stato di conservazione e di funzionalità dei quadri in particolare se all'esterno o in ambienti particolarmente severi • Verifica periodica dell'impianto di messa a terra
Sistema di regolazione	• Verifica del corretto funzionamento delle sonde di temperatura, di concentrazione di CO₂, orologi programmabili e temporizzatori • Verifica del corretto funzionamento degli attuatori (serrande motorizzate) e degli inverter
Condense	• Ispezione e verifica dello stato di conservazione delle vaschette di raccolta e dei sistemi di drenaggio delle condense

Tab. 4.6 – Indicazioni per la manutenzione dell'impianto

Generalmente viene stipulato un contratto di manutenzione tra il Committente e la ditta che può assumere il ruolo di Terzo Responsabile, Gestore o Manutentore dell'impianto, in cui vengono specificate le operazioni da svolgere sull'impianto, le tempistiche per interventi programmati e per le urgenze, i costi ordinari e i costi straordinari. La definizione di un buon contratto di manutenzione è sempre una garanzia per il corretto funzionamento dell'impianto con il conseguimento di un livello di efficienza elevato.

Il Piano di Manutenzione prevede inoltre le tempistiche per le suddette verifiche a seconda delle macchine e degli impianti installati, della destinazione d'uso, della tipologia di dispositivo (elettrico, meccanico, elettronico, attivo, passivo) o di componente (scambiatori, filtri) e della funzione svolta.

Per una corretta redazione del Piano di Manutenzione è necessario ottenere informazioni specifiche dai costruttori per i singoli componenti dell'impianto e fare riferimento ai dati in letteratura per quanto riguarda l'impianto generale.

5 IL CASO STUDIO

In questo capitolo viene illustrato un caso studio per la progettazione in via preliminare di un sistema di ventilazione meccanica con recuperatore di calore per un edificio di tipo scolastico, facendo riferimento a quanto già descritto nel capitolo 4 e ponendo come obiettivo l'analisi dei seguenti parametri:

- Variazione del carico termico
- Variazione dell'energia primaria per riscaldamento
- Incidenza dell'energia elettrica per impianto ventilazione

confrontando lo stato di fatto con la situazione in progetto che prevede un impianto di ventilazione meccanica con recuperatore di calore senza regolazione sulla portata e con una seconda soluzione che prevede l'impianto di ventilazione meccanica controllata con recuperatore di calore.

5.1 Caratteristiche dell'edificio

L'edificio in esame è la scuola elementare e materna "Schiaparelli" del Comune di Occhieppo Inferiore (BI) le cui caratteristiche climatiche e geografiche riportate nella tabella 5.1.

DATI CLIMATICI		
Comune		OCCHIEPPO INFERIORE
Provincia		Biella
Altitudine	m s.l.m.	410
Gradi Giorno (GG)		2576
Zona Climatica		E
Temperatura esterna	° C	- 8,9
Periodo convenzionale di riscaldamento	giorni	183
Data accensione impianti (convenzionale)		15 ottobre
Data spegnimento impianti (convenzionale)		15 aprile
Irradianza solare (*)	W/m ²	275,5

Tab. 5.1 – Caratteristiche Comune di Occhieppo Inferiore (BI)

Le dimensioni dell'edificio sono indicate nella tabella 5.2

	Valore netto	Valore lordo
Superficie in pianta [m ²]	1352	1558
Volume [m ³]	4176	5933
(*) superficie e volume al netto delle strutture dell'involucro che li delimitano		
(**) superficie e volume al lordo (=comprensivi) delle strutture dell'involucro che li delimitano		

Tab. 5.2 – Dimensioni edificio

La superficie disperdente lorda dell'involucro è pari a 3012 m² con un rapporto di forma (S/V) di 0,51.

L'involucro originario dell'edificio è realizzato prevalentemente con telaio in calcestruzzo armato e tamponamenti in laterizio, mentre è stato recentemente realizzato un piccolo ampliamento sul lato nord con l'impiego di strutture coibentate secondo i requisiti previsti per Legge.

Nella simulazione per il calcolo si tiene conto anche dei seguenti interventi di riqualificazione energetica:

- sostituzione dei serramenti obsoleti per raggiungere un buon livello di isolamento termico e ridotta permeabilità all'aria nelle superfici vetrate di tutto l'edificio (a completamento di interventi già realizzati in precedenza)
- Coibentazione del solaio di copertura del piano primo confinante verso il vano sottotetto non riscaldato, mediante posa di pannelli semirigidi in lana minerale posati a secco all'estradosso

- Coibentazione del solaio di pavimento del piano terreno confinante con il piano interrato non riscaldato mediante applicazione di pannelli rigidi in polistirene o fibra minerale all'intradosso.



Fig. 5.1 – Facciata edificio

Il calcolo delle dispersioni dell'edificio allo stato di fatto secondo la modalità prevista dalla UNI TS 11300 consente di determinare la ripartizione della potenza termica come indicato nella tabella 5.3 e nel grafico di figura 5.2.

	Superficie disperdente	Potenza termica
	[m²]	[W]
Pareti perimetrali	1116,02	41610
Solai di pavimento	814,66	7215
Solai di copertura	824,18	7172
Serramenti	262,17	17976
Ponti termici		589
Totale	3017,03	74562

Tab. 5.3 – Ripartizione dispersioni termiche edificio

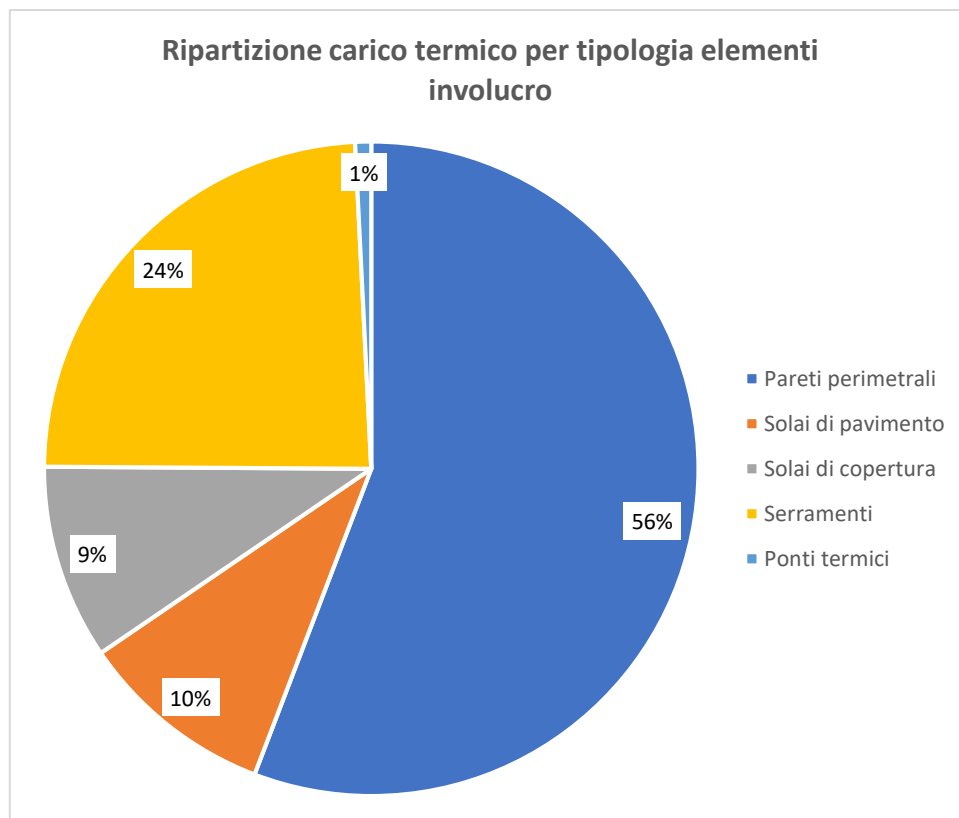


Fig. 5.2 – Dispersioni termiche edificio

Il carico termico complessivo dell'impianto allo stato di fatto è indicato nella tabella 5.4.

Dispersioni trasmissione	[W]	74561
Dispersioni ventilazione	[W]	133254
Dispersioni per funz. Interm.	[W]	27046
Totale dispersioni	[W]	234861

Tab. 5.4 – Carico termico totale

In base al calcolo la potenza termica disponibile resa dai corpi scaldanti è inferiore al carico richiesto, tuttavia nella situazione reale, in presenza di ventilazione naturale, non è possibile conoscere il valore corretto del termine corrispondente al ricambio dell'aria.

5.2 Impianto termico esistente

L'impianto di riscaldamento è ad acqua, a radiatori. La caldaia è a condensazione, alimentata a gas metano, di marca ICI CALDAIE, modello MONOLITE 160 JB con una potenza al focolare di 189 kW, illustrata nella figura 5.3.

Il sistema di distribuzione è costituito da anello al piano seminterrato e colonne montanti, con pompa di circolazione SALMSON PRIUS MASTER 65-80, a giri variabili con inverter.

I corpi scaldanti sono radiatori in ghisa, prevalentemente installati in posizione sottofinestra, con una potenza complessiva di 170 kW.

La termoregolazione che agisce sulla centrale termica (caldaia e gruppo di distribuzione con valvola miscelatrice) è di tipo climatico, mentre su tutti i corpi scaldanti sono state installate valvole termostatiche per la regolazione della temperatura e dell'energia erogata nei singoli locali.



Fig. 5.3 –Generatore di calore impianto riscaldamento

5.3 Impianto di ventilazione in progetto

Per migliorare le condizioni di qualità dell'aria e per consentire un incremento dell'efficienza energetica si prevede l'installazione di un impianto di ventilazione meccanica con recuperatore di calore, con caratteristiche tali da:

- Fornire la corretta portata di aria in tutti i locali, in particolare per le aule in cui si svolgono le attività didattiche
- Migliorare il comfort degli ambienti sia in termini di qualità dell'aria, sia in termini di benessere termo-igrometrico
- Ottimizzare i consumi energetici mediante l'introduzione di recupero termico

La configurazione adottata per la progettazione dell'impianto è di tipo locale e prevede l'installazione di macchine di ventilazione distribuite in prossimità delle zone servite sfruttando il volume al piano interrato e il volume del sottotetto che può essere reso accessibile mediante realizzazione di apposite botole dall'interno. In questo caso la realizzazione di una rete articolata di condotte d'aria con diametri importanti all'interno dei volumi climatizzati risulterebbe più complessa e di difficile implementazione rispetto all'architettura interna dell'edificio.

5.3.1 Unità di ventilazione

La scelta delle macchine è determinata in base alle portate d'aria da trattare. Si può prevedere l'impiego delle già citate unità di marca AERMEC modelli RPF o RPLI costituite da:

- scambiatore aria/aria in controcorrente, a piastre in alluminio, ad alta efficienza
- Ventilatori (mandata e ripresa) con motore sincrono a magneti permanenti a controllo elettronico
- Filtrazione integrata (filtro G4 aria in espulsione e filtro F7 aria in immissione)
- Quadro elettrico di potenza e regolazione elettronica integrata con possibilità di interfaccia tipo BUS

L'efficienza degli scambiatori dipende dalla dimensione dell'unità ed è variabile dal 75% all'80% considerata a secco (in assenza di fenomeni di scambio termico con calore latente).

Per il calcolo delle portate, ritenendo validi i requisiti e i parametri di riferimento esposti nel paragrafo 4.2, si considera una portata di aria nominale massima totale pari a circa 20.000 m³/h con una ripartizione per zone in relazione a ciascuna unità di ventilazione. Il dimensionamento è indicato nella tabella 5.5.

Zona	Numero locali	Tipologia locali	Portata aria totale [m ³ /h]	Tipologia di macchina	Installazione
1.1	3	Atrio, aula, portineria	1.200	RPF 013	Seminterrato
1.2	2	Sala riunioni	3600	RPLI 400	Seminterrato
1.3	4	Aule, corridoio, servizi	2300	RPF 020	Locale antibagno (install. Verticale)
1.4	3	Aule,	2100	RPF 020	Ripostiglio aula (verticale)
1.5	5	corridoio, servizi	1630	RPLI 200	Formazione controsoffitto in locale antibagno (orizzontale)
2.1	5	Aula, atrio, corridoio, servizi	1750	RPLI 200	Sottotetto
2.2	2	Aule	1800	RPLI 200	Sottotetto
2.3	4	Aule, corridoio, servizi	2750	RPLI 300	Sottotetto
2.4	5	Aule, corridoio, servizi	3100	RPF 020	Sottotetto

Tab. 5.5 – Ripartizione impianto in zone

Nelle tavole 3 e 4 in allegato sono riportate le planimetrie dei locali in cui è illustrata la ripartizione dell'impianto di ventilazione per zone.

5.3.2 Sistema di distribuzione

La distribuzione dell'aria prevede dorsali verticali a salire dal piano interrato o a scendere dal piano sottotetto verso i locali serviti, sfruttando nella maggior parte dei casi cavedi esistenti e non utilizzati per altre funzioni. Ove possibile, in particolare per la distribuzione delle maggiori portate, si prevede l'utilizzo di canali d'aria in lamiera zincata di sezione circolare, nel diametro indicativo di 250 – 300 mm per le condotte principali, e poi a diminuire per le diramazioni secondarie. In alcuni casi, in presenza di portate minime (nell'ordine di 40 m³/h) o per esigenze di spazio, è possibile adottare

una canalizzazione distribuita con canali corrugati flessibili in polietilene ad alta densità (PEHD) del diametro di 75 mm, che meglio si prestano a curve e deviazioni pur garantendo perdite di carico limitate. Nei tratti verticali in cui i canali d'aria possono essere accessibili è opportuno prevedere protezioni in muratura, in cartongesso o con gusci in metallo fissati a parete mediante incollaggio o tassellatura, mentre per la distribuzione orizzontale è preferibile posizionare canali a vista all'intradosso dei solai. Un esempio per l'installazione è illustrato nella tavola 5 allegata.

Sia nella fase progettuale sia nella fase di direzione lavori è importante prevedere il corretto posizionamento di aperture di ispezione per la manutenzione periodica dell'impianto e la verifica dello sporcamento dei canali.

5.3.3 Sistema di immissione ed estrazione

Come già descritto nel capitolo 4.4 la progettazione del sistema di immissione ed estrazione dell'aria in ogni singolo locale deve considerare la disposizione delle bocchette nei locali per massimizzare l'efficienza di ventilazione, cercando di coinvolgere con il ricambio dell'aria tutto il volume. Con riferimento alla tabella 3.3 le bocchette di immissione vengono posizionate a parete, in prossimità del soffitto, sfruttando l'effetto Coanda, e le bocchette di estrazione vengono posizionate sulla parete opposta, nella parte inferiore, con una distanza di interasse tale da garantire la corretta distribuzione in ambiente.

Nella tavola 5 in allegato è riportato il modello di immissione ed estrazione dell'aria in sezione e in pianta per un locale rappresentativo della maggior parte degli ambienti interessati all'intervento.

Per una singola aula (portata di ventilazione di 900 m³/h) si ipotizza la configurazione descritta dai parametri in tabella 5.6.

Configurazione bocchette mandata e ripresa locale: AULA		
	Bocchetta di mandata	Bocchetta di ripresa
Marca e modello	AIR CAR mod. MA	AIR CAR mod. RA25
Dimensioni [mm]	300x150	400x200
Numero	4	3
Velocità di immissione [m/s]	2,3	3,0
Portata nominale [m ³ /h]	250	300
Lancio con $v_t=0,5$ m/s [m]	2,1	
Caduta di pressione [Pa]	4	10
Indice rumorosità [dB]	23	24

Tab 5.6 – Ricambi d'aria di progetto in locali uso scolastico

5.3.4 Sistema di regolazione

Per la regolazione degli impianti è opportuno tenere conto dell'effettivo utilizzo dei locali con azione proporzionale alla concentrazione di occupanti, pertanto è prevista l'installazione di sonde di rilevamento della concentrazione di CO₂ negli ambienti. Le sonde sono interfacciate con il sistema di modulazione che può essere costituito dal motore a giri variabili direttamente nell'unità di ventilazione o su serrande motorizzate lungo le linee di distribuzione.

E' prevista inoltre una programmazione oraria che può svolgere la funzione di avviamento e arresto degli impianti in orari specifici durante la giornata, può attivare funzioni di raffrescamento (mediante *by-pass* dello scambiatore nell'unità ventilante) in modalità "*free-cooling*" e può programmare brevi intervalli di funzionamento alla massima portata in corrispondenza degli intervalli tra le lezioni.

5.4 Benefici energetici

Per determinare i benefici energetici derivanti dall'installazione dell'impianto di ventilazione meccanica si pongono a confronto tre situazioni:

- A) Situazione ante-operam (Stato di fatto): ventilazione naturale definita con i parametri previsti dalla UNI TS 11300 (si consideri che il calcolo reale delle dispersioni per ventilazione naturale non è quantificabile)
- B) Situazione in progetto (VM 100%): impianto di ventilazione meccanica con recuperatore termico ad alta efficienza, con funzionamento a portata nominale
- C) Situazione in progetto (VMC): impianto di ventilazione meccanica controllata con recuperatore termico

Prima di procedere ad una analisi energetica si è provveduto ad una verifica della corrispondenza tra il carico termico e la potenza termica installata, data dalla sommatoria della potenza nominale di tutti i corpi scaldanti e dalla potenza di targa del generatore. In condizioni di progetto con temperatura esterna pari a -9 °C la potenza richiesta raggiunge il valore di 186 kW (regime di funzionamento con attenuazione notturna) per il quale l'impianto esistente può ritenersi

adeguato. Per questa verifica è stato adottato il calcolo mediante firma energetica, che esprime la potenza termica necessaria per garantire il bilancio termico in funzione della variazione della temperatura esterna.

Nella figura 5.4 è illustrato il diagramma relativo alla firma energetica nei tre casi indicati.

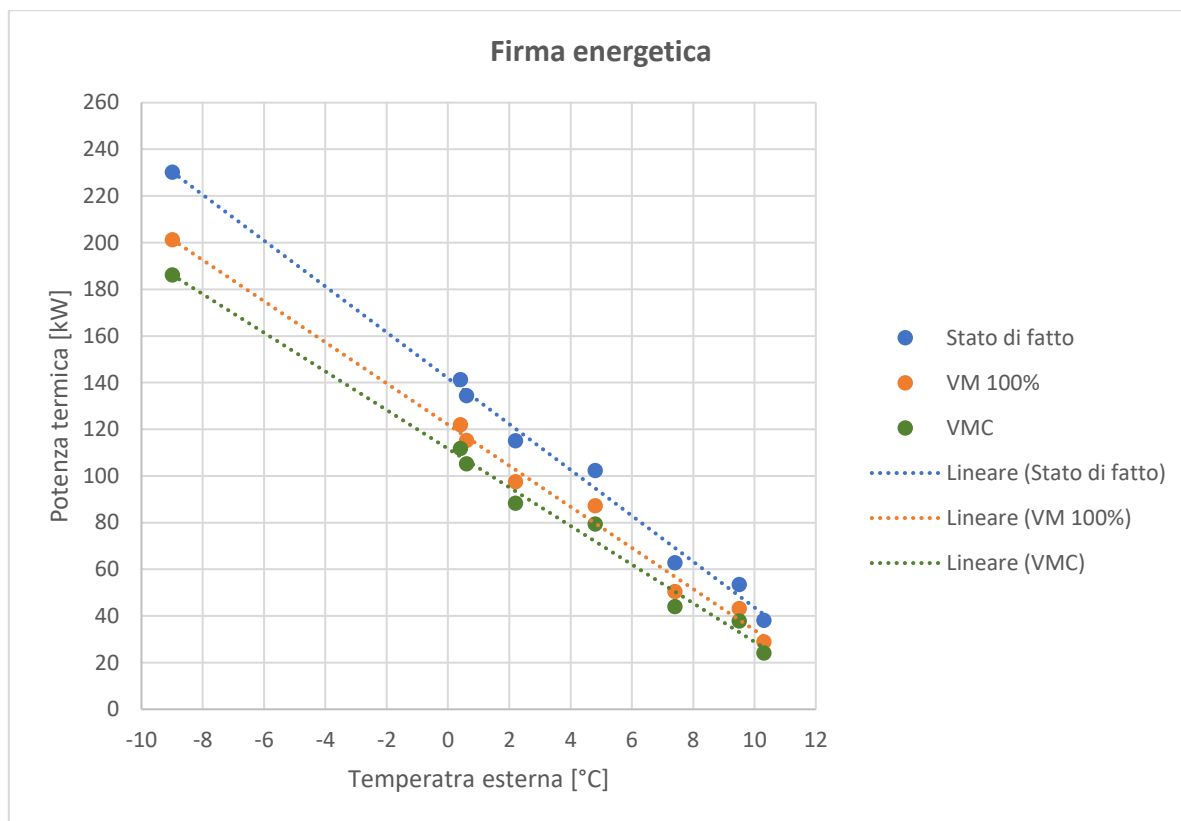


Fig. 5.4 – Firma energetica (scenari a confronto)

Dal punto di vista energetico sono stati valutati per ciascuna delle situazioni sopra descritte i seguenti parametri:

1) Fabbisogno energia primaria per riscaldamento, i cui valori sono indicati nel grafico in figura 5.5.

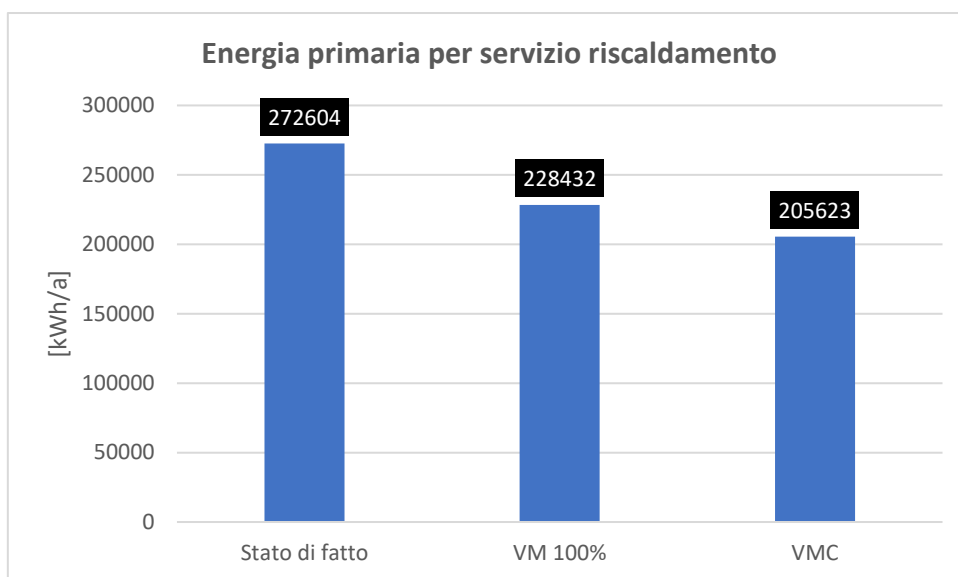


Fig. 5.5 – Energia primaria per riscaldamento (dati a confronto)

2) Fabbisogno energia elettrica per sistema di ventilazione meccanica, i cui valori sono indicati nel grafico in figura 5.6.

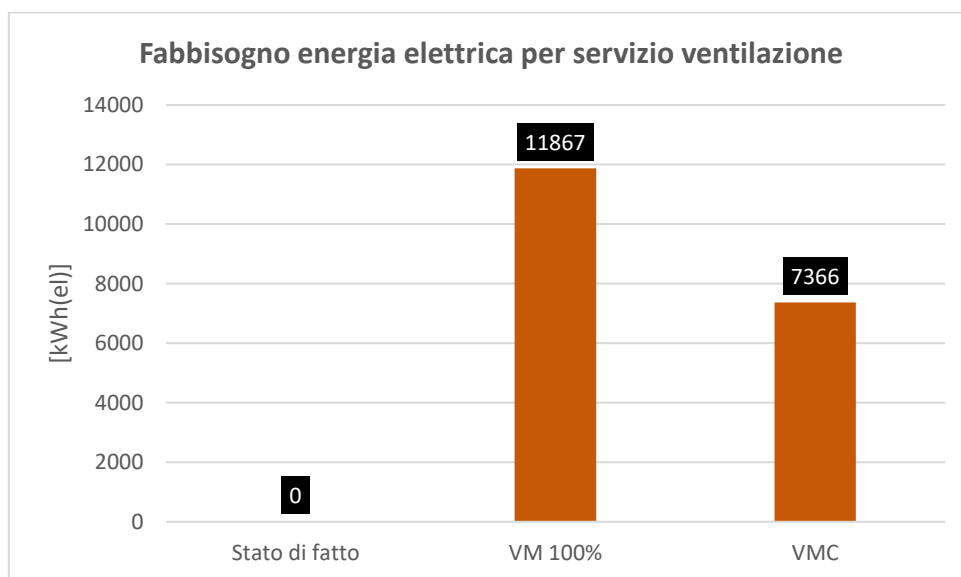


Fig. 5.6 – Energia elettrica per ventilazione (dati a confronto)

3) Fabbisogno energia primaria totale per riscaldamento e sistema di ventilazione meccanica, i cui valori sono indicati nel grafico in figura 5.7.

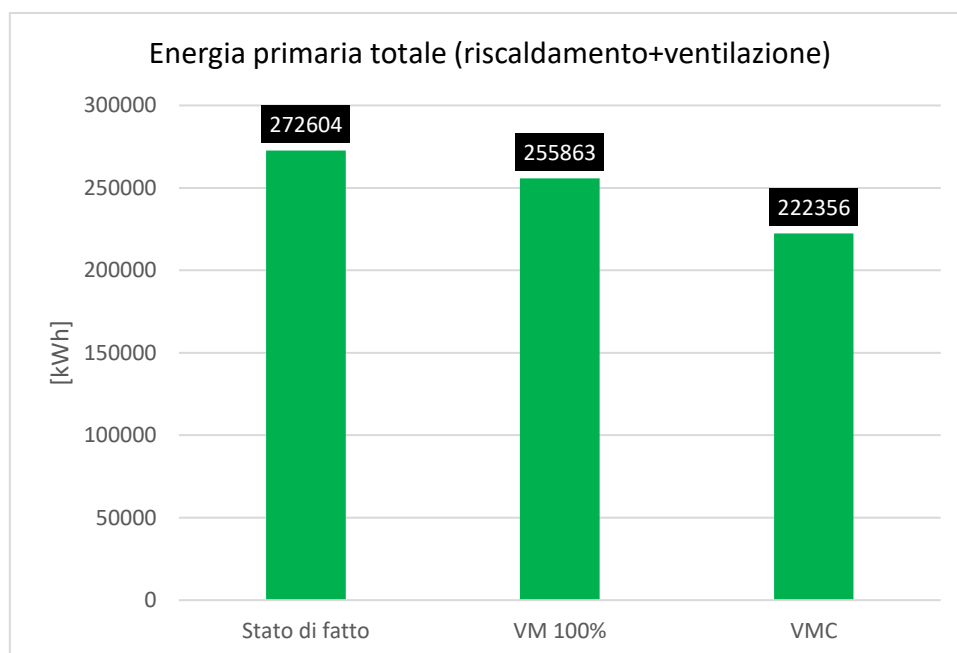


Fig. 5.7 – Energia primaria totale per riscaldamento e ventilazione (dati a confronto)

Il risparmio atteso in termini di energia per il riscaldamento è pari al 25% ma occorre tenere in considerazione l'incremento di consumo di energia elettrica, pertanto per una valutazione completa è opportuno considerare l'energia primaria totale che tiene conto sia del riscaldamento sia dell'energia elettrica (con opportuno fattore di conversione $f_p=2,42$): il risparmio atteso è pari al 19%.

5.5 Valutazione dei costi

La valutazione dei costi è stata calcolata facendo riferimento alle voci di prezziario regionale Regione Piemonte 2018, per un totale indicativo di **Euro 90.000,00** (4,50 €/m³/h) comprensivo delle seguenti voci di fornitura e posa in opera:

- Unità di recupero termico completa di scambiatore a flusso in controcorrente, ventilatori, filtri, by-pass, quadro elettrico di bordo
- Accessori per unità ventilante (serrande, giunti antivibranti, boccole antivibranti per basamento), setti silenzianti

- Impianto elettrico per alimentazione quadro a bordo macchina con derivazione da quadro elettrico principale e cablaggio sensori
- Sistema di distribuzione, canali d'aria e bocchette, serrande manuali o motorizzate
- Opere murarie a corredo

Per la valutazione del tempo di ritorno dell'intervento si considerano due voci di spesa:

- Riduzione del fabbisogno di energie termica e quindi riduzione di spesa per acquisto combustibile
- Incremento dei consumi di energia elettrica per alimentazione delle unità ventilanti

Si ottiene così la valutazione indicativa descritta nella tabella 5.7 dalla quale risulta che il tempo di ritorno dell'intervento è superiore a 20 anni.

Risparmio gas metano	6400	m3/a
Costo unitario gas metano	0,8	€/m3
Risparmio economico	5.120,00	€/a
Consumo energia elettrica	7350	kWh/a
Costo unitario energie elettrica	0,22	€/kWh
Spesa media annua	1.617,00	€/a
Risparmio totale conseguibile	3.503,00	€/a
Investimento	90.000,00	€
Tempo di ritorno (Pay-back semplice)	25,69	a

Tab. 5.7 – Analisi economica

Occorre considerare inoltre i costi per gli interventi di manutenzione periodici che sono indispensabili a tutela del corretto funzionamento degli impianti e della qualità dell'aria.

6 CONCLUSIONI

La ventilazione meccanica è una soluzione impiantistica che risponde all'esigenza di garantire un livello adeguato di benessere all'interno degli ambienti climatizzati, e si integra in modo particolare negli edifici in cui vengono effettuati interventi di coibentazione e sostituzione dei serramenti, che riducono la permeabilità all'aria e comportano una netta riduzione degli apporti dovuti alla ventilazione naturale.

Con riferimento particolare alle scuole, le motivazioni essenziali per giustificare l'introduzione della ventilazione meccanica con sistemi di recupero termico sono:

- L'indice di affollamento negli ambienti chiusi per un elevato numero di ore determina una concentrazione di contaminanti tale da richiedere elevate portate di aria di ricambio
- La ventilazione naturale non è sufficiente per garantire corretti livelli di qualità dell'aria in quanto ha un regime casuale ed è determinata da parametri variabili (condizioni meteorologiche esterne, pressione atmosferica, incidenza dei venti) e soggettivi (apertura manuale dei serramenti). Inoltre l'aria in ingresso trasporta all'interno dell'edificio polveri e inquinanti provenienti dall'esterno.
- In termini energetici la ventilazione naturale mediante aerazione può determinare riduzioni anche significative, se pur temporanee, della temperatura interna e quindi determinare una condizione di disagio termo-igrometrico per gli occupanti
- La ventilazione meccanica consente di ridurre una parte importante dei contaminanti presenti nell'aria in ingresso, grazie al sistema di filtrazione.

- La ventilazione meccanica integrata con un sistema di recupero termico consente di rendere il sistema energetico più efficiente riducendo i costi di gestione.
- La ventilazione meccanica, infine, consente di modulare la portata di ventilazione in funzione del tempo o mediante un “timer”, oppure attraverso un sistema di controllo basato sul rilievo della concentrazione di inquinante, e, se la geometria e la tipologia delle bocchette di immissione ed estrazione è correttamente progettata permette di ottimizzare la rimozione degli inquinanti massimizzando l’efficienza della ventilazione

Gli ambienti scolastici sono frequentati con tempi di permanenza elevati da bambini e ragazzi in una età in cui lo sviluppo del sistema immunitario non è completamente sviluppato e l’organismo è più vulnerabile, quindi è di fondamentale importanza l’attenzione alla qualità dell’aria e al benessere termoigrometrico. Come dimostrato dagli studi su queste problematiche molte malattie di carattere respiratorio trovano origine anche nelle condizioni dell’aria negli ambienti scolastici e questo incide negativamente su costi sociali indiretti che, non essendo facilmente quantificabili, non possono essere presi in considerazione nel calcolo economico dei benefici indicato nel capitolo 5.

Sarebbe auspicabile l’attivazione a livello nazionale di meccanismi di incentivazione per l’implementazione di sistemi per il miglioramento della qualità dell’aria negli edifici scolastici, alla pari di quanto è già in corso da alcuni anni sul piano energetico (Conto Termico G.S.E., Bando Finanziamento Fondo Kyoto D.M. 40/2016) con azioni e programmi strutturali per:

- Estendere le azioni di monitoraggio su un campione elevato ed eterogeneo di edifici scolastici con il coinvolgimento degli enti preposti quali ARPA, ASL, Agenzie per l’Energia (RENAEL)
- Fornire una corretta e diffusa informazione sui vantaggi ottenibili da una maggiore attenzione alla qualità dell’aria negli ambienti scolastici, sia verso le Amministrazioni Provinciali e Comunali sia nei confronti delle famiglie
- Individuare parametri standard per la verifica dell’efficacia degli interventi (efficienza di ventilazione, efficienza energetica del sistema, concentrazioni limite)
- Premiare interventi “virtuosi” e integrati, che tengano in considerazione il miglioramento della qualità dell’aria e il miglioramento dell’efficienza energetica mediante contributi a fondo perduto o finanziamenti agevolati
- Attivare verifiche e sistemi di monitoraggio “post-operam” per analizzare nel tempo i risultati ottenuti in termini di spese di gestione e di costi indiretti.

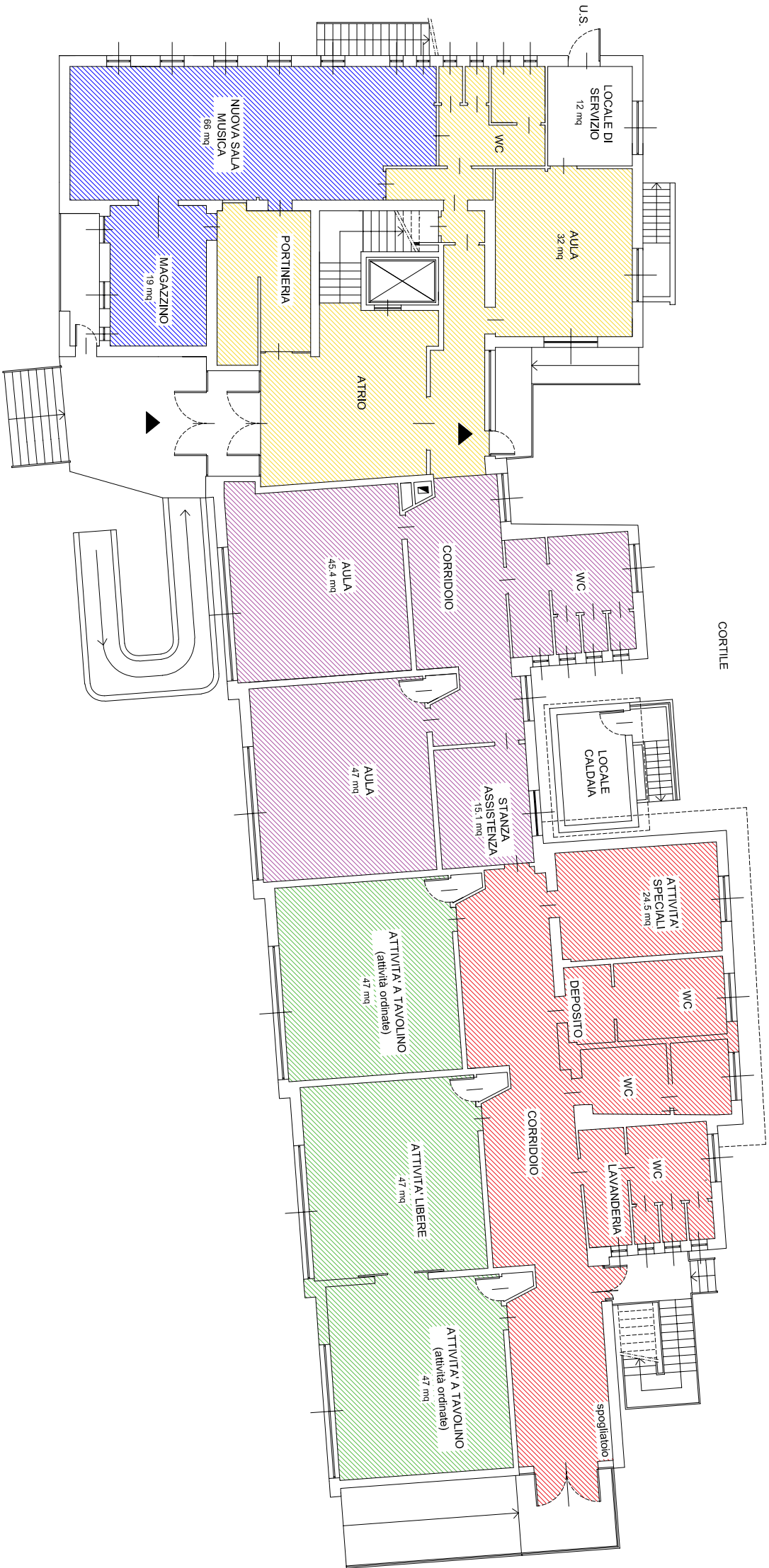
Come diretta conseguenza, un programma nazionale di ampia diffusione potrebbe condurre a una più diffusa maturazione delle competenze nel settore da parte dei tecnici progettisti e delle aziende, per approfondire e ricercare soluzioni sempre più efficienti e innovative, coinvolgendo le aziende nelle fasi di ricerca e sviluppo di prodotti adeguati alla tipologia specifica di applicazione.

7 FONTI E BIBLIOGRAFIA

- [1] EUR-LEX (<https://eur-lex.europa.eu>)
- [2] ENEA (www.enea.it)
- [3] www.direttiva27.it
- [4] Norma UNI 10339:1995
- [5] Progetto di norma prUNI 10339:2014 edito da C.T.I. (Comitato Termotecnico Italiano)
- [6] D.M. 18-12-1975 - Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica (*G.U. 02-02-1976, n. 29, Supplemento ordinario*)
- [7] Norma UNI TS 11300-1 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale
- [8] Norma UNI TS 11300-2 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali
- [9] Norma EN 15232 - Prestazione energetica degli edifici - Parte 1: Impatto dell'automazione, del controllo e della gestione tecnica degli edifici
- [10] G. Alfano – M. Filippi – E. Sacchi, Impianti di climatizzazione per l'edilizia. Dal progetto al collaudo, Ed. Masson
- [11] Air infiltration and ventilation centre University of Warwick Science Park, *A guide to energy efficient ventilation*, Ed. AIVC International Energy Agency
- [12] Ministero della Salute, sito web www.salute.gov.it
- [13] ISPRA, sito web www.isprambiente.gov.it
- [14] Gian Vincenzo Fracastoro, Matteo Serraino, Energy analyses of buildings equipped with exhaust air heat pumps (EAHP), Elsevier (February 2010)
- [15] Luca Ferrari, L'efficienza della ventilazione, R.C.I. (Riscaldamento, Climatizzazione, Idronica) n. 7/2014



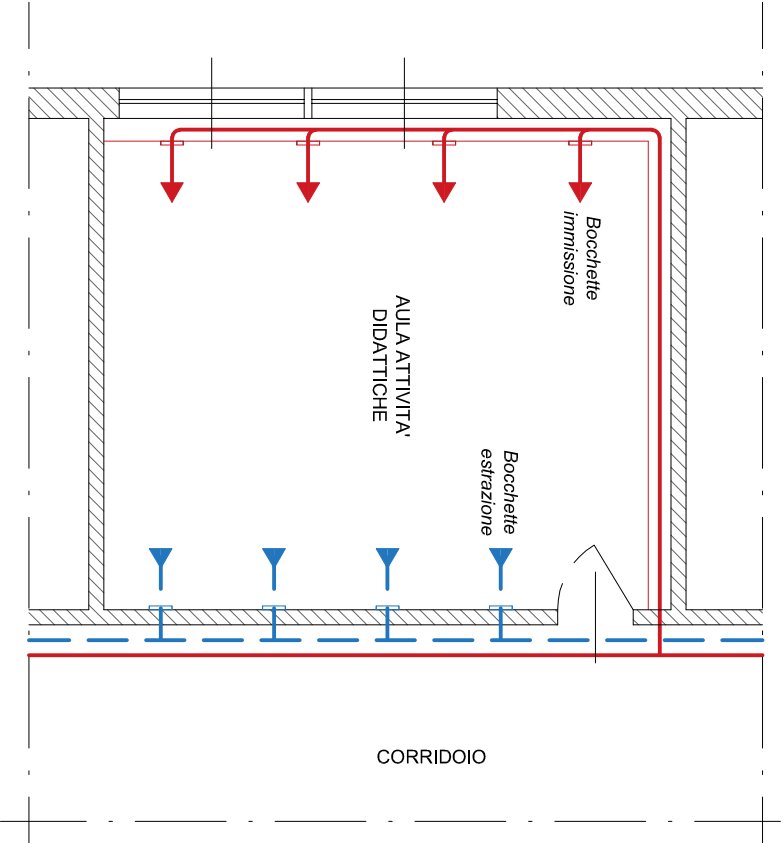




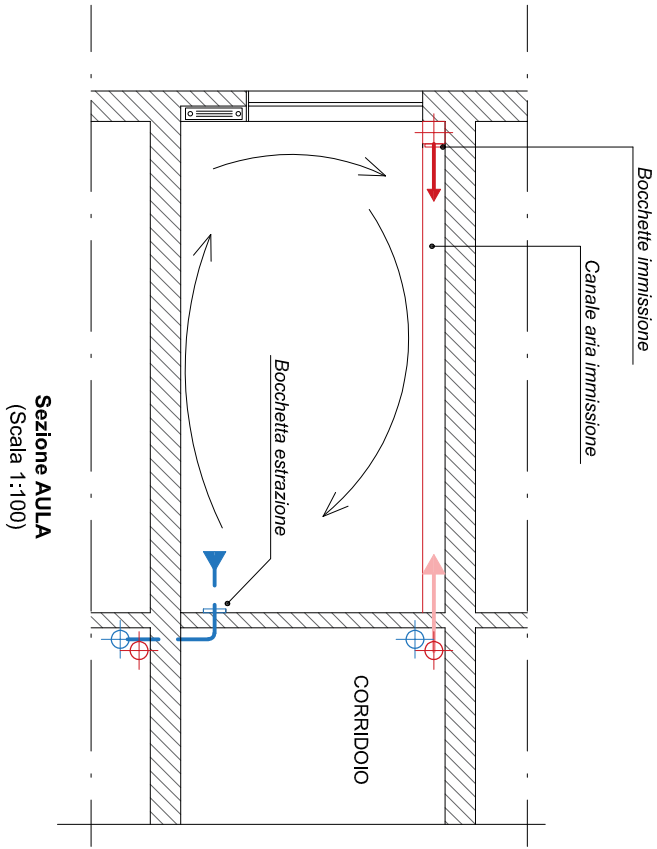
- | | |
|---|----------|
|  | ZONA 1.1 |
|  | ZONA 1.2 |
|  | ZONA 1.3 |
|  | ZONA 1.4 |
|  | ZONA 1.5 |



	ZONA 2.1
	ZONA 2.2
	ZONA 2.3
	ZONA 2.4



Planimetria AULA
(Scala 1:100)



Sezione AULA
(Scala 1:100)