



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in:
INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di Laurea:

**CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI UNA CAMERA
CLIMATICA USATA PER VALUTARE LA DIFFUSIONE
DELL'ARIA E LA CONCENTRAZIONE DI CO₂**

*Experimental Characterization of a Climate Chamber used to Evaluate Air
Diffusion and CO₂ Concentration*

Relatore:
Prof. Gianluca Coccia

Candidato:
Giovanni Del Moro

Anno accademico 2023/2024

Indice

Introduzione	VII
1. Stato dell'arte	1
1.1. Indoor air quality (IAQ)	1
1.1.1. Inquinanti fisici.....	3
1.1.2. Inquinanti chimici.....	4
1.1.3. Inquinanti biologici	9
1.1.4. L'impatto degli inquinanti dell'aria interna sulla salute umana	9
1.2. Comfort termico	10
1.2.1. Definizione	10
1.2.2. Metodo di Fanger	11
1.2.3. Approccio del comfort adattivo	14
1.2.4. Modelli di comfort personalizzati	15
1.2.5. Discomfort locale	15
1.3. Ventilazione	18
1.3.1. Efficienza di ventilazione	18
1.3.2. Tasso di ricambio d'aria	19
1.3.3. Ventilazione naturale	19
1.3.4. Limiti e vantaggi della ventilazione naturale	25
1.3.5. Ventilazione meccanica	26
1.3.6. Ventilazione ibrida.....	28
1.3.7. Condotti aeraulici	29
1.3.8. Ventilatori	30
1.3.9. Recuperatori di calore.....	32
1.3.10. Attenuatori acustici.....	34
1.3.11. Filtri	35
1.3.12. Batterie di riscaldamento e raffrescamento	36
1.3.13. Dispositivi per la regolazione della portata	36
2. Camera climatica.....	37
2.1. Interventi migliorativi.....	39
2.1.1. Applicazione del nastro a tenuta d'aria	39
2.1.2. Isolamento della porta	40
2.2. Setup per la misurazione della CO ₂	41

2.2.1.	Sensore Hobo® MX CO2 Logger (MX1102A)	41
2.2.2.	Sensore LSI Lastem BS01031	46
2.2.3.	Sistema di erogazione CO ₂	49
2.3.	Setup misura velocità dell'aria	52
2.3.1.	Unità di ventilazione con recuperatore	52
2.3.2.	Sistema a due assi	59
3.	Prove di CO ₂	64
3.1.	Prove antecedenti a interventi migliorativi della camera	64
3.1.1.	Prima prova del 27/02/24	64
3.1.2.	Seconda prova del 28/02/2024	66
3.1.3.	Terza prova del 29/02/2024	68
3.2.	Prove successive agli interventi migliorativi.....	70
3.2.1.	Quarta prova del 21/03/2024	70
3.2.2.	Quinta prova del 25/03/2024	72
3.3.	Confronto delle prove pre e post interventi	74
4.	Misura della velocità dell'aria.....	75
4.1.	Prova del 23/05 con $n = 1,5$	78
4.2.	Prova del 24/05 con $n = 5$	80
5.	Conclusioni.....	82
	Bibliografia.....	84

Indice delle figure

Figura 1: concentrazione di formaldeide negli ambienti esterni e interni [3]	5
Figura 2: concentrazione di TVOC negli ambienti esterni e interni [3]	6
Figura 3: andamento del PPD in relazione al PMV [5]	14
Figura 4: percentuale di insoddisfatti in funzione della differenza tra la temperatura dell'aria a livello della testa e quella a livello delle caviglie [7]	16
Figura 5: ventilazione frontale	20
Figura 6: ventilazione passante	20
Figura 7: classificazione e portate d'aria di infiltrazione (da UNI EN 12207:2000) [8]	22
Figura 8: rappresentazione dell'effetto camino	24
Figura 9: distribuzione della pressione esterna (p_e), della pressione interna (p_i), differenza di pressione tra interno ed esterno (Δp) e posizione del livello di pressione neutra (LPN) in un ambiente di altezza elevata [8]	24
Figura 10: schema di ventilazione meccanica a semplice estrazione (a sinistra) e a destra a flusso bilanciato [8]	26
Figura 11: sistema di ventilazione meccanica a semplice flusso per abitazioni collettive [8]	27
Figura 12: schema di sistema di ventilazione meccanica bilanciata semi centralizzata per abitazioni collettive [8]	28
Figura 13: canali in lamiera zincata a sezione rettangolare e circolare spiralata	29
Figura 14: canali in PVC e flessibili	29
Figura 15: ventilatori centrifughi e assiali	30
Figura 16: diagramma pressione-portata di un ventilatore centrifugo [8]	31
Figura 17: recuperatore di calore a piastre	32
Figura 18: recuperatore a flussi incrociati e controcorrente	32
Figura 19: recuperatore rotativo e termodinamico	33
Figura 20: silenziatore passivo cilindrico	34
Figura 21: silenziatore passivo rettangolare	34
Figura 22: filtri in fibra di cellulosa	35
Figura 23: batterie di riscaldamento/raffrescamento aria-acqua	36
Figura 24: pianta della camera climatica	37
Figura 25: camera climatica	37
Figura 26: diffusore di mandata	38
Figura 27: pannelli radianti	38
Figura 28: pannelli radianti	38
Figura 29: impianto idraulico per pannelli radianti	38
Figura 30: scheda tecnica nastro SIGA Sicrall®	39
Figura 31: applicazione del nastro su intercapedini e fessure	39
Figura 32: plastica espansa incollata nel telaio in alluminio della porta	40
Figura 33: plastica espansa incollata nel telaio in alluminio della porta	40
Figura 34: HOB0® MX CO2 Logger (MX1102A) [10]	41
Figura 35: sensori HOB0® in fase di calibrazione	43
Figura 36: pianta della camera con le aste per il collocamento dei sensori	44
Figura 37: sezione C-C della camera climatica con vista delle aste e relativi sensori ...	44

Figura 38: software HOBObconnect per l'acquisizione dei dati	45
Figura 39: sensore LSI Lastem BS01031	46
Figura 40: scheda tecnica LSI Lastem BS01031	46
Figura 41: a sinistra l'asta con i sensori HOBOb e a destra quella con il sensore Lastem	47
Figura 42: VI LabVIEW per l'acquisizione della CO ₂ con il sensore Lastem.....	48
Figura 43: bombola con sistema riduttore di pressione ed elettrovalvola Camozzi U7J	49
Figura 44: elettrovalvola Camozzi U7J	49
Figura 45: relè finder 60.12	50
Figura 46: VI LabVIEW per il controllo dell'elettrovalvola	50
Figura 47: ugello di erogazione collegato al tubo flessibile in gomma.....	51
Figura 48: pianta camera climatica con sistema di erogazione CO ₂ e ventilatori	51
Figura 49: unita di ventilazione meccanica con recuperatore "Roccheggiani DRU"	52
Figura 50: venturimetro collegato alla mandata	54
Figura 51: trasduttore di pressione differenziale "Druck LPX 5481"	54
Figura 52: VI LabVIEW della portata di aria istantanea (m ³ /h) in uscita dal recuperatore	56
Figura 53: balometro "Testo 420" nella fase di posizionamento.....	57
Figura 54: grafico riportante la portata in funzione della potenza fornita all'unità di ventilazione.....	58
Figura 55: VI LabVIEW per il set della portata	58
Figura 56: sistema a due assi	59
Figura 57: guida dell'asta orizzontale e motore passo-passo dell'asta verticale	59
Figura 58: motore passo-passo Nema 24 serie S.....	60
Figura 59: curva di coppia motore Nema 24 serie S [12].....	60
Figura 60: anemometri per la misura di V _x e V _z posizionati sul supporto	61
Figura 61: vista di anemometri e sistema a due assi in pianta.....	61
Figura 62: trasmettitore serie HD2903	62
Figura 63: VI LabVIEW per la lettura e l'acquisizione delle velocità	63
Figura 64: sistema a due assi per la rilevazione della velocità dell'aria in ripresa	75
Figura 65: VI LabVIEW per l'input delle posizioni al sistema a due assi.....	76
Figura 66: mappa velocità prima rilevazione	78
Figura 67: mappa velocità seconda rilevazione.....	78
Figura 68: mappa velocità terza rilevazione.....	79
Figura 69: mappa velocità quarta rilevazione.....	79
Figura 70: mappa velocità prima rilevazione	80
Figura 71: mappa velocità seconda rilevazione.....	80
Figura 72: mappa velocità terza rilevazione.....	81
Figura 73: mappa velocità quarta rilevazione.....	81

Indice delle tabelle

Tabella 1: permeabilità all'aria di riferimento a 100 Pa e alle pressioni massime di prova, in rapporto alle superfici totali (da UNI EN 12207:2000) [8].....	21
Tabella 2: permeabilità all'aria di riferimento a 100 Pa e alle pressioni massime di prova, in rapporto alla lunghezza dei lati apribili (da UNI EN 12207:2000) [8]	22
Tabella 3: valori del coefficiente di pressione C_p (R = rapporto lunghezza-larghezza, E = esposto, SE = semiesposto, S = schermato) [8].....	23
Tabella 4: scheda tecnica HOBO® MX CO2 Logger (MX1102A)	42
Tabella 5: scheda tecnica Roccheggiani DRU [11]	53
Tabella 6: scheda tecnica trasduttore Druck LPX 5481 [15].....	55
Tabella 7: scheda tecnica balometro "Testo 420"	57
Tabella 8: portata in funzione dei ricambi orari	58
Tabella 9: ingombri e range d'azione del sistema a 2 assi	60
Tabella 10: scheda tecnica trasmettitore serie HD2903.....	62
Tabella 11: foglio di calcolo	76

Indice dei simboli

Latini

C_p = coefficiente di pressione
 n = tasso di ricambio orario (h^{-1})
 Q = portata (m^3/h)
 v = velocità (m/s)
 V = volume (m^3)

Greci

ε_v = efficienza di ventilazione
 ρ = densità dell'aria (kg/m^3)

Acronimi

BRI = Building Related Illness
 CH_2O = formaldeide
CO = monossido di carbonio
CO₂ = anidride carbonica
COHb = carbossiemoglobina
IAQ = Indoor Air Quality
IIAAC = Intolleranza Idiopatica Ambientale ad Agenti Chimici
IPA = Idrocarburi Policiclici Aromatici
LPN = Livello di Pressione Neutra
MCS = Multiple Chemical Sensitivity
NO = monossido di azoto
NO₂ = diossido di azoto
OMS = Organizzazione Mondiale della Sanità

PM = particolato
PMV = Predicted Mean Vote
PPD = Predicted Percentage of Dissatisfied
ppm = Parti Per Milione
SO₂ = biossido di zolfo
TVOC = Total Volatile Organic Compounds
UTA = Unità di Trattamento Aria
VOC = Volatile Organic Compounds

Introduzione

L'importanza della qualità dell'aria e del comfort termico è sempre più riconosciuta nella progettazione degli edifici. Questo lavoro si propone di analizzare e migliorare le condizioni ambientali all'interno di una camera climatica, con particolare attenzione agli inquinanti atmosferici e alla loro riduzione.

Nel Capitolo 1 saranno esposti i principi fondamentali relativi alla qualità dell'aria interna, al comfort termico e alla ventilazione. Si esamineranno gli inquinanti fisici, chimici e biologici e il loro impatto sulla salute umana, nonché i metodi di valutazione del comfort termico, inclusi il metodo di Fanger e l'approccio del comfort adattivo. Infine, verrà esplorato il tema della ventilazione, con la descrizione delle diverse tipologie e un'analisi dei relativi vantaggi e limitazioni.

Nel Capitolo 2 sarà descritta la camera climatica e gli interventi migliorativi che vi sono stati apportati. Si analizzeranno le applicazioni del nastro a tenuta d'aria e l'isolamento della porta, così come i setup per la misurazione della CO₂ e della velocità dell'aria. Verrà fornita un'analisi dettagliata dell'attrezzatura utilizzata e delle modifiche implementate per migliorare la qualità dell'ambiente di prova.

Il Capitolo 3 presenterà i risultati delle prove di CO₂ condotte prima e dopo gli interventi migliorativi nella camera climatica, con un confronto dei dati ottenuti per evidenziare l'efficacia delle modifiche apportate. Verranno discussi in dettaglio i cambiamenti osservati nelle concentrazioni di CO₂ e le loro implicazioni sulla qualità dell'aria interna. Saranno inoltre presentate considerazioni sul sistema di ventilazione e sulla distribuzione della CO₂ all'interno della camera climatica. Questo capitolo fornirà una valutazione complessiva degli interventi migliorativi e delle loro conseguenze sulla salute e il benessere degli occupanti.

Nel Capitolo 4 sarà trattata la misura della velocità dell'aria, includendo i risultati delle prove effettuate e la valutazione delle prestazioni del sistema a due assi e dell'unità di ventilazione con recuperatore. Questo capitolo offrirà un'analisi dettagliata delle misurazioni e delle loro implicazioni per il comfort termico e la qualità dell'aria interna.

Infine, nelle conclusioni, verrà evidenziato come gli interventi migliorativi implementati abbiano contribuito a ridurre la dispersione degli inquinanti e ad aumentare l'accuratezza delle misurazioni. Verranno inoltre presentate le limitazioni incontrate e i possibili sviluppi futuri.

1. Stato dell'arte

1.1. Indoor air quality (IAQ)

L'acronimo IAQ sta per *Indoor Air Quality*, che in italiano significa qualità dell'aria interna. Secondo la definizione fornita dal Ministero dell'Ambiente [1] l'inquinamento indoor è descritto come "la modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria interna, causata dalla presenza di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e la salubrità dell'aria, costituendo così un pericolo o un danno diretto o indiretto per la salute umana.

A differenza dell'inquinamento dell'aria atmosferica esterna (*outdoor pollution*), oggetto di grande attenzione già da molti anni, solo in quelli più recenti è emersa l'esigenza di approfondire le conoscenze sull'inquinamento indoor, soprattutto di fronte all'aumento di evidenze scientifiche allarmanti sugli effetti sanitari legati a questo fenomeno.

Per molti inquinanti, i livelli di concentrazione sono spesso più alti all'interno che all'esterno: secondo l'agenzia per la protezione dell'ambiente degli Stati Uniti (US EPA), possono essere da 2 a 5 volte superiori. I livelli di inquinamento dell'aria interna possono essere notevoli soprattutto nelle case dove vengono utilizzati combustibili fossili e/o da biomasse in stufe non ventilate per cucinare e riscaldare [2].

Questa valutazione diventa tanto più rilevante in termini di salute se si considera che i cittadini europei trascorrono in media il 90% del loro tempo al chiuso. Il rischio è ancor maggiore nei gruppi di popolazione più vulnerabili. Ciò potrebbe essere dovuto all'età (gli anziani passano più tempo al chiuso) o alla situazione socioeconomica. Le famiglie a basso reddito potrebbero non avere i mezzi finanziari per investire in un riscaldamento più pulito ed efficiente dal punto di vista energetico.

Principali problematiche dell'inquinamento dell'aria *indoor*:

- l'aria all'interno può essere più inquinata di quella esterna, ma soprattutto le esposizioni indoor sono maggiori di quelle outdoor, proprio perché la quantità di tempo trascorso dalle persone all'interno di ambienti confinati è superiore, rispetto a quello trascorso all'esterno[1];

- le persone possono essere esposte nell'arco di una stessa giornata all'azione nociva di inquinanti presenti negli ambienti di vita, di lavoro e sui mezzi di trasporto; le esposizioni possono causare effetti sulla salute a lungo termine anche per piccole concentrazioni di inquinanti;
- l'esposizione ad alcuni inquinanti presenti nell'aria interna può essere responsabile della comparsa di specifiche patologie o dell'aggravamento di patologie preesistenti. Numerosi inquinanti negli ambienti interni, in primo luogo il fumo passivo e i prodotti della combustione, contribuiscono all'aumento di incidenza di malattie respiratorie croniche, malattie cardiovascolari, asma ed allergie e/o al loro aggravamento;
- alcuni inquinanti interni contribuiscono ad aumentare l'incidenza di tumori nella popolazione; la presenza di miscele di composti organici nell'aria interna può causare effetti sub-clinici a carico del sistema nervoso periferico e centrale, con influenze sul comportamento e sulla performance. Un altro problema dell'inquinamento dell'aria negli ambienti confinati è relativo alle limitate conoscenze sulla natura delle sostanze emesse dai materiali usati negli edifici e sul loro potenziale impatto sulla salute [1].

Nel settore delle costruzioni vengono usati migliaia di composti chimici a dosi elevate. Molti di questi composti rilasciati nell'aria impattano sugli individui presenti nell'edificio e vengono assorbiti dall'organismo. Considerazioni analoghe possono essere fatte per i materiali utilizzati nel settore dei trasporti e per i prodotti di largo consumo come detersivi, preservanti e materiali per le pulizie nelle abitazioni e in altri tipi di edifici. Le valutazioni tossicologiche e del rischio per la salute sono disponibili solo per una piccola parte di questi inquinanti interni.

Gli effetti sulla salute correlati all'alterazione della qualità dell'aria interna costituiscono un fenomeno complesso, perché legati a diversi fattori ambientali e individuali, tra cui[1]:

- tipologia e concentrazione dell'inquinante;
- presenza di sinergie con altri inquinanti;
- tempo di esposizione;
- parametri microclimatici e suscettibilità delle persone esposte.

Gli effetti possono essere acuti (a breve termine), o cronici (a lungo termine).

Gli effetti a breve termine possono presentarsi dopo una singola esposizione o dopo esposizioni ripetute a un singolo inquinante (o miscele di inquinanti) anche a basse concentrazioni. Effetti acuti possono verificarsi in seguito a esposizioni di breve durata a elevate concentrazioni di un inquinante tossico (o di più inquinanti), come nel caso di incidenti domestici dovuti a fughe di gas e intossicazione acuta da monossido di carbonio (CO). Generalmente, la sintomatologia dura poco tempo e scompare con l'eliminazione della fonte di inquinamento (nei casi in cui è identificabile).

Gli effetti a lungo termine si manifestano dopo un'esposizione prolungata a livelli di concentrazione anche modeste o dopo esposizioni ripetute, potendosi manifestare anche a distanza di svariati anni dall'esposizione. Numerose evidenze dimostrano che l'inquinamento dell'aria interna può rappresentare un importante fattore che contribuisce alla genesi di malattie cardiovascolari ed altre malattie sistemiche e che alcuni inquinanti interni possono contribuire all'aggravamento di patologie preesistenti. Nel complesso gli effetti sulla salute associati ad una cattiva qualità dell'aria interna possono essere classificati in:

- Malattie associate agli edifici (*Building Related Illness-BRI*)
- Sindrome dell'edificio malato (*Sick Building Syndrome*)
- Sindrome da sensibilità chimica multipla (*Multiple Chemical Sensitivity syndrome*) MCS o Intolleranza Idiopatica Ambientale ad Agenti Chimici (IIAAC) [1].

1.1.1. Inquinanti fisici

La temperatura dell'aria è un fattore significativo per mantenere un livello ragionevole di comfort termico all'interno di un edificio. Temperature superiori o inferiori al valore consentito comportano una diminuzione del livello di comfort termico e dell'efficienza lavorativa dei residenti [3].

L'umidità relativa è descritta dal livello di umidità nell'aria.

- Le membrane mucose degli occhi e del naso sono influenzate dalla diminuzione del contenuto di umidità, causando secchezza e conseguente irritazione di questi organi.
- Una maggiore umidità facilita l'ingresso di particelle di polvere nelle vie respiratorie, il che può portare a malattie come la bronchite. Inoltre, un'alta umidità aumenta l'emissione di inquinanti dai materiali da costruzione, influenzando la qualità dell'aria interna (VOC e CH₂O). Un indice di umidità relativa più elevato può contribuire a creare condizioni interne favorevoli alla crescita di microbi e muffe.

Il movimento dell'aria è anche un parametro fisico importante per valutare la qualità dell'aria interna (IAQ), ma non ha un impatto diretto sulla salute umana; tuttavia, se la velocità è troppo alta, può portare alla secchezza della pelle. L'OMS stabilisce un valore guida di 0,25 m/s per la velocità dell'aria [3].

1.1.2. Inquinanti chimici

Di seguito sono riportati i più comuni inquinanti chimici dell'aria interna, che hanno effetti negativi sulla salute umana:

- Formaldeide
- Composti organici volatili
- Diossido di azoto
- Monossido di carbonio
- Idrocarburi aromatici policiclici
- Radon
- Particolato respirabile
- Ozono

Formaldeide

La formaldeide (CH₂O) viene rilasciata dalla combustione o decomposizione di biomasse nell'ambiente e anche attraverso i vulcani. Le fonti di formaldeide indoor possono includere diversi metodi di combustione, materiali da costruzione e prodotti per la pulizia domestica. È un probabile cancerogeno per l'uomo che viene prodotta da mobili e articoli

in legno realizzati con resine urea-formaldeide. Attraverso varie reazioni chimiche, la formazione secondaria di formaldeide avviene anche negli ambienti interni, ad esempio, attraverso la reazione tra ozono e terpeni. Identificare il principale contributore ai livelli di formaldeide negli ambienti interni è molto difficile. Tuttavia, le valutazioni hanno rilevato che le emissioni dai prodotti in legno pressato sono le principali fonti di tossicità per inalazione nelle abitazioni. Le possibili vie di esposizione alla formaldeide includono l'inalazione e l'ingestione. In [figura 1](#) la concentrazione di CH_2O negli ambienti interni ed esterni per la stagione primaverile era rispettivamente di 87,6 ppm e 29 ppm; che è aumentata rispettivamente a 105,6 ppm e 37 ppm per la stagione estiva. Gli studi suggeriscono anche che la concentrazione di CH_2O indoor è generalmente più alta rispetto alla concentrazione outdoor [3].

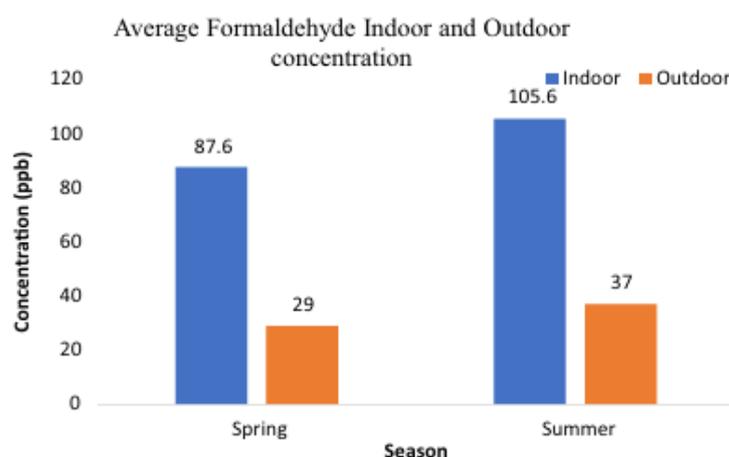


Figura 1: concentrazione di formaldeide negli ambienti esterni e interni [3]

VOC

I VOC (Composti Organici Volatili) sono una categoria di sostanze a base di carbonio con la caratteristica capacità di evaporare a basse temperature o temperature ambiente. Negli ambienti esterni le emissioni dell'industria e il traffico rappresentano le principali fonti di VOC. Tra le fonti interne vi sono vernici, solventi, adesivi, pesticidi domestici e il fumo di tabacco.

Sostanze come benzene, etilbenzene e toluene, presenti nei VOC, hanno effetti tossici sull'organismo umano. A seconda della tossicità, gli effetti sulla salute possono essere

acuti o cronici, influenzando le funzioni vitali del corpo. Alcuni VOC sono noti per essere cancerogeni per l'uomo. Le concentrazioni all'interno degli ambienti sono generalmente più elevate rispetto a quelle esterne, e le possibili spiegazioni includono l'impiego di materiali isolanti, materiali da costruzione e dispositivi elettronici. La concentrazione di TVOC varia con le stagioni: in [figura 2](#), la concentrazione media di TVOC misurata all'interno e all'esterno è stata rispettivamente di 321,8 e 113,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per l'estate e di 465,8 e 187,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per l'inverno, con valori di concentrazione di TVOC più elevati durante la stagione invernale [3].

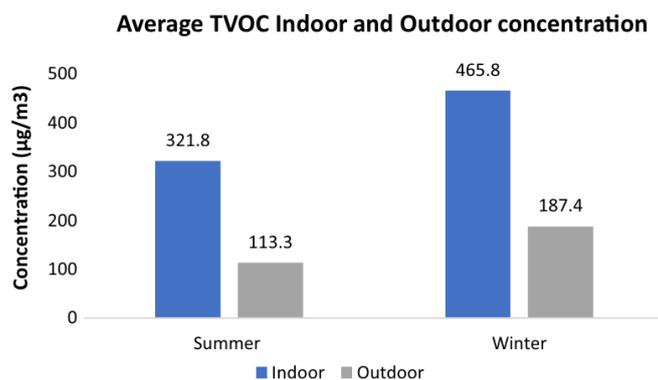


Figura 2: concentrazione di TVOC negli ambienti esterni e interni [3]

Diossido di azoto

La produzione di ossidi di azoto avviene nell'aria ambiente quando ossigeno e azoto si mescolano a temperature elevate durante i vari processi di combustione. Il NO_2 si forma per rapida ossidazione del NO nell'aria mediante ossidanti disponibili come ossigeno, ozono e VOC. In ambienti interni, questa ossidazione avviene a un ritmo molto più lento. La principale fonte esterna di NO_2 è il traffico stradale, mentre tra le fonti interne vi sono il fumo di tabacco e il fumo derivante da vari processi di combustione. È stato osservato che il NO_2 esterno influisce sulle concentrazioni interne. La principale via di esposizione è l'inalazione. I dati attuali della letteratura mostrano che i tassi di NO_2 negli ambienti interni differiscono nettamente rispetto ai livelli esterni, ma sono spesso influenzati dalla quantità di combustibile utilizzato in cucina e dal tasso di ricambio dell'aria [3].

Monossido di carbonio

Il monossido di carbonio è un gas inodore, incolore, non irritante e privo di sapore, prodotto dalla combustione incompleta di combustibili come legno, benzina, cherosene,

gas naturale e carbone. Non può essere percepito dall'essere umano né attraverso la vista, l'olfatto o il gusto. Nel corpo umano, l'emoglobina reagisce con il CO per formare la carbossiemoglobina (COHb), sostanza che diminuisce la capacità dell'emoglobina di trasportare l'ossigeno nel sangue; poiché il cervello e i muscoli sono le parti del corpo che richiedono più ossigeno, sono le prime a essere colpite.

A basse dosi il CO non è pericoloso, ma già a concentrazioni nel sangue pari al 10-20%, il soggetto manifesta i primi sintomi come lieve mal di testa, stanchezza o vertigini, mentre a concentrazioni elevate (> 350 ppm) può risultare fatale.

Negli ambienti interni, il CO viene rilasciato da fonti di combustione come cucine e sistemi di riscaldamento, ed è anche introdotto dall'aria esterna negli ambienti interni attraverso l'infiltrazione. Le emissioni da apparecchi di cottura o riscaldamento difettosi o male ventilati e la combustione di biomasse sono le fonti più significative di CO nell'aria interna. Un'altra fonte importante include il fumo di tabacco, il funzionamento dei veicoli a motore nelle abitazioni con garage annesso e i camini a legna. Studi suggeriscono che le fonti esterne come le emissioni veicolari influenzino i livelli interni di CO nelle aree urbane, mentre nelle aree distanti dalla strada, le emissioni esterne di CO non aumentano le concentrazioni interne di CO ma cause come la combustione di legna e il fumo di tabacco sono state trovate responsabili dei livelli elevati di CO [3].

IPA

Gli IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici) sono una categoria di composti organici caratterizzati dalla presenza di più di due anelli aromatici di benzene e si trovano prevalentemente in fase vapore. Gli IPA associati ad altre particelle costituiscono una minaccia per la salute umana. Il benzopirene è un cancerogeno riconosciuto e contribuisce al potenziale cancerogeno totale degli IPA, il quale varia dal 51% al 64%.

Questi idrocarburi si formano durante la combustione ad alte temperature di materiali carboniosi. Le emissioni veicolari rappresentano la principale fonte esterna di concentrazione, contribuendo al 46-90% degli IPA nell'aria ambiente nelle aree urbane. La contaminazione dell'aria interna da IPA proviene da fonti come il riscaldamento domestico, la cottura, i camini aperti, il fumo di tabacco e anche dalla combustione di

incenso. Numerosi studi indicano che la concentrazione negli ambienti interni tende ad essere tipicamente superiore a quella rilevata all'aperto [3].

Radon

Il radon si forma a causa del decadimento del radio nelle rocce e nel suolo, e può infiltrarsi negli ambienti interni raggiungendo concentrazioni che rappresentano un rischio per la salute umana. La principale fonte di radon negli ambienti interni è data dal decadimento del radio presente nel terreno sotto le fondamenta delle abitazioni, il quale penetra attraverso crepe nelle fondamenta stesse. Anche se solitamente meno dell'1% dell'aria interna proviene dal terreno, le abitazioni con fondamenta poco sigillate, costruite su terreni molto permeabili, possono avere molti punti di ingresso per il gas del terreno e ricevere più del 10% dell'aria dal suolo. Le emissioni di radon dai materiali da costruzione sono generalmente basse, ma ne esistono alcuni che possono avere concentrazioni più elevate di radio, come quelli realizzati in tufo vulcanico e calcestruzzo con scisto di allume o materiali industriali di scarto [3].

Particolato fine

Le particelle con un diametro di 10 μm o meno sono generalmente indicate come PM10 e sono sufficientemente piccole da penetrare nella parte più profonda dei polmoni durante il processo respiratorio; perciò sono chiamate particelle sospese respirabili. Il PM10 è una miscela di particelle che include fumo, polvere, acidi e metalli e la sua concentrazione dipende dalle attività svolte dagli occupanti e dalla penetrazione dell'aria esterna nell'edificio. Il fumo di tabacco e la cottura dei cibi sono fonti prominenti di PM10 indoor. La concentrazione di PM10 indoor è fortemente influenzata dalle concentrazioni esterne associate alla densità del traffico. Le famiglie di fumatori hanno livelli più alti di PM10 all'interno rispetto ai livelli esterni [3].

Ozono

L'ozono ha un odore intenso; reagisce con sostanze come gli acidi grassi e forma composti dall'odore penetrante. Anche a bassi livelli, può essere potenzialmente dannoso per gli esseri umani. Oltre a causare problemi di salute, ha un impatto negativo su tessuti e reperti conservati.

La presenza di ozono nell'aria ambiente è il risultato di reazioni fotochimiche nello strato atmosferico superiore. Le concentrazioni di ozono all'aperto sono generalmente più elevate nelle aree altamente popolate e con abbondante luce solare. Le apparecchiature elettriche come fotocopiatrici, stampanti e dispositivi generanti ozono sono responsabili della sua produzione negli ambienti interni. L'ozono può anche essere generato da precipitatori elettrostatici e filtri dell'aria, ma i produttori di tali sistemi cercano di limitarne la produzione. Gli occhi, la gola e le narici sono seriamente colpiti dall'ozono, e l'esposizione prolungata può causare una riduzione delle funzioni polmonari e un aumento dello stress, contribuendo così a malattie cardiovascolari [3].

1.1.3. Inquinanti biologici

I bioaerosol sono aerosol o particelle sospese di origine vegetale, animale o microbica (con dimensioni che vanno da 0,001 a 100 μm). Questi includono funghi, microbi, virus, micotossine batteriche ed endotossine, fibre vegetali, pollini, ecc. L'esposizione a questi bioaerosol è associata a una varietà di conseguenze negative per la salute umana. Le malattie respiratorie sono le conseguenze più significative per la salute legate ai bioaerosol. Le fonti di bioaerosol indoor sono piante d'appartamento, muffe, occupanti, animali domestici, materiali da costruzione, rifiuti organici e l'infiltrazione dell'aria esterna nell'edificio. I sintomi dei problemi di salute causati da agenti biologici includono starnuti, tosse, febbre, irritazione corneale e problemi digestivi. I microrganismi tendono a proliferare nei sistemi di ventilazione degli edifici e, una volta esposti, possono causare malattie come la febbre da umidificatore. Le allergie causate dagli inquinanti biologici sono principalmente dovute a muffe e pollini [3].

1.1.4. L'impatto degli inquinanti dell'aria interna sulla salute umana

L'aria interna contiene una vasta gamma di tossine e la maggior parte di esse ha effetti nocivi sulla salute umana. Donne e bambini piccoli sono i più colpiti poiché trascorrono la maggior parte del tempo in casa. Vari contaminanti hanno una concentrazione molto più alta negli ambienti interni rispetto a quelli esterni. Inoltre, la concentrazione di inquinanti come VOC, CH_2O , CO_2 , SO_2 , NO_2 e particolato, anche a basse concentrazioni, può avere un impatto significativo sulla salute degli occupanti a causa dell'esposizione cronica. Il problema della sindrome da edificio malato è associato a solventi specifici e ad altre variabili come la velocità dell'aria, il tasso di CO_2 , il tasso di ricambio dell'aria e

l'umidità relativa. Numerosi studi suggeriscono che l'inquinamento dell'aria interna aumenta il rischio di malattie polmonari come la broncopneumopatia cronica ostruttiva, la bronchite e l'asma. Il NO₂ e il PM indoor sono stati collegati alla bronchite e alla broncopneumopatia cronica ostruttiva. Mentre CH₂O e VOC tendono a essere i principali contaminanti dell'aria interna e sono ritenuti responsabili di diversi problemi di salute, come l'irritazione delle mucose, degli occhi, la fatica e, inoltre, influenzano il sistema nervoso centrale umano. Studi recenti hanno osservato che gli ftalati sono una potenziale fonte di problemi respiratori: essi sono responsabili della bioaccumulazione nei tessuti umani e hanno effetti negativi sulla salute umana. I livelli di bioaerosol nell'ambiente sono correlati a una vasta gamma di esiti sanitari e implicazioni di salute pubblica, tra cui malattie infettive, asma e cancro. Il deterioramento dei polmoni e la difficoltà respiratoria sono le conseguenze sanitarie più importanti associate ai bioaerosol [3].

1.2. Comfort termico

1.2.1. Definizione

Nella UNI EN ISO 7730 viene definita come la "condizione che esprime la soddisfazione con l'ambiente termico circostante. L'insoddisfazione può essere causata dal disagio del corpo umano nel suo complesso in relazione al caldo o al freddo, oppure dal raffreddamento (o riscaldamento) di una specifica parte del corpo". Nonostante il gran numero di parametri che la possono influenzare (ambientali e personali), alla base della sensazione termica del corpo umano c'è la temperatura degli organi interni che, in individui sani, si attesta sui 37 °C, con una variazione di circa mezzo grado centigrado.

In ASHRAE 55-2004 si afferma che "Il comfort termico è la condizione che esprime la soddisfazione con l'ambiente termico circostante ed è stimato tramite una valutazione soggettiva" [4].

La determinazione del comfort risulta piuttosto complessa, poiché il concetto non è strettamente legato a evidenze scientifiche. È invece un aspetto qualitativo influenzato da preferenze personali, sociali e circostanziali, regolato da diverse variabili che possono essere raggruppate in tre macrocategorie [4]:

- Variabili personali: metabolismo, stato di salute, vestiario, età, sesso, adattabilità, abitudini alimentari, posizione, stato psicologico e sociologico.
- Variabili ambientali locali: correnti d'aria, stratificazione della temperatura dell'aria, emissioni di gas.
- Variabili ambientali globali: clima, temperatura esterna e interna, umidità interna ed esterna, radiazione, qualità dell'aria.

1.2.2. Metodo di Fanger

A partire dal 1970, Fanger sviluppa il primo modello di comfort, basato sul concetto di bilancio energetico. La sua teoria si fonda su due ipotesi fondamentali [5].

Prima ipotesi di Fanger

Fanger sostiene che il comfort termico è possibile solo in ambienti termici moderati. Partendo da questa premessa, gli ambienti possono essere suddivisi in base alle condizioni del microclima, che può essere distinto in tre tipologie:

Moderato: in queste condizioni di microclima, il comfort termico è assicurato poiché si verificano le seguenti caratteristiche:

- Omogeneità dei fattori ambientali;
- Scambi termici uomo-ambiente limitati;
- Livello di attività fisica uniforme e basso tra gli utenti;
- Uniformità nel vestiario;
- Non vi è la necessità specifica di regolare o limitare uno o più parametri ambientali.

Caldo severo: si registrano temperature elevate, alta umidità relativa e velocità dell'aria, insieme a:

- Condizioni microclimatiche non uniformi (con elevata variabilità zonale e temporale);
- Disomogeneità nel vestiario e nelle attività svolte.

Freddo Severo: si riscontrano basse temperature dell'aria, con:

- Limitata variabilità spaziale e temporale delle condizioni ambientali;
- Uniformità nel vestiario e nei livelli di attività;
- Necessità di un maggiore sforzo per l'adattamento.

In entrambi i casi, vi sono restrizioni sui parametri ambientali. Nei due scenari più estremi, i meccanismi di termoregolazione del corpo umano agiscono sull'accumulo e sulla dissipazione di calore, rendendo necessario ridurre al minimo lo stress termico per garantire il comfort [5].

Seconda ipotesi di Fanger

Per esprimere il concetto di comfort in termini ingegneristici, è necessario considerare il corpo umano come un sistema termodinamico che trasforma il cibo in lavoro e calore, analogamente a quanto avviene nelle macchine termiche inanimate. L'energia non convertita in lavoro viene dissipata nell'ambiente attraverso meccanismi di perdita di calore sensibile e latente.

Vengono ipotizzati tre meccanismi:

- Perdita radiante verso superfici più fredde o guadagno da superfici più calde;
- Perdita per convezione verso l'aria più fredda o guadagno dall'aria più calda;
- Perdita di calore per respirazione, ovvero il passaggio di calore dall'aria secca all'aria più fresca.

L'esperimento condotto da Fanger coinvolgeva una popolazione di soggetti posti in una camera climatica controllata, al fine di determinare la temperatura ambiente ideale per diverse combinazioni di parametri ambientali. Questo ha permesso di delineare regole e correlazioni generali tra i parametri coinvolti.

Alcuni parametri, come la velocità dell'aria, la temperatura media radiante, l'umidità relativa, i livelli di attività e il vestiario, vengono variati di volta in volta. La temperatura interna viene regolata fino a raggiungere una condizione di neutralità termica, in cui le percezioni di caldo e freddo verso il microclima circostante vengono annullate.

Durante l'esperimento, gli individui vengono mantenuti passivi e non hanno alcuna influenza sul proprio ambiente o su sé stessi, fornendo solo un feedback qualitativo sulla loro percezione termica [5].

Dall'esperimento è stata derivata l'equazione del comfort:

$$S = M - W - R - C - C_k - E_d - E_{sw} - E_{ve} - C_{ve} = 0 \quad (5)$$

Dove:

- S = Variazione unitaria di energia interna del corpo umano per unità di tempo;
- M = Potenza unitaria prodotta dal metabolismo umano;
- W = Potenza meccanica unitaria che il corpo umano cede all'ambiente;
- R = Potenza termica unitaria dispersa per irraggiamento;
- C = Potenza termica unitaria dispersa per convezione;
- C_k = Potenza termica unitaria dispersa per conduzione;
- E_d = Potenza termica unitaria dispersa per diffusione attraverso la pelle;
- E_{sw} = Potenza termica unitaria dispersa per sudorazione attraverso la pelle;
- $E_{ve} + C_{ve}$ = Potenza termica unitaria dispersa nella respirazione come calore latente (E_{ve}) e come calore sensibile (C_{ve}).

Questo parametro S viene definito da Fanger come “la differenza tra il calore interno prodotto e le perdite di calore verso l'ambiente attuale per un uomo, mantenendo i valori del comfort per la temperatura della pelle e per la sudorazione a livello di attività attuale”[5].

PMV e PPD

Il modello PMV (*Predicted Mean Vote*), sviluppato originariamente nella seconda metà degli anni '60 da Fanger, è un indice che rappresenta il valore medio delle votazioni della sensazione termica di un gruppo di persone che occupano un ambiente specifico, su una scala di sensazione termica a 7 punti da -3 (freddo) a 3 (caldo). Basato su dati ottenuti attraverso studi in camera climatica e una selezione di adulti sani, il modello calcola le sensazioni di comfort termico in base alla dinamica del calore tra il corpo e l'ambiente. Il modello definisce la neutralità termica come la condizione in cui un gruppo di persone non si sente né caldo né freddo in un ambiente [5].

Inoltre, l'indice PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), calcolato in funzione dell'indice PMV, quantifica la percentuale prevista di persone termicamente insoddisfatte in un ambiente. Gli standard raccomandano che la temperatura interna ottimale sia definita quando il PPD è inferiore al 10%, il che corrisponde a un indice PMV compreso tra $-0,5$ e $0,5$. Pertanto, l'applicazione di questo modello comporta il mantenimento di una singola temperatura interna ottimale costante senza variazioni durante tutto il giorno o la stagione [5].

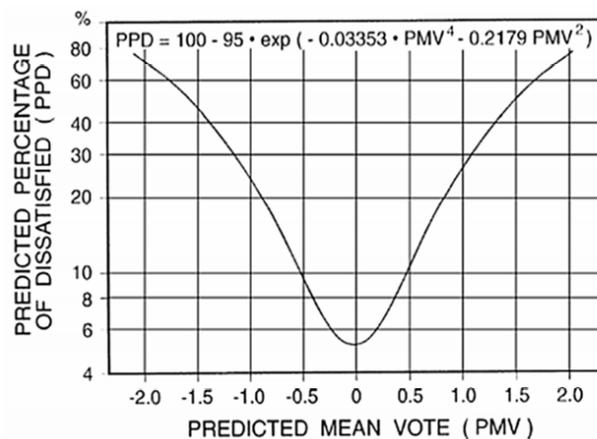


Figura 3: andamento del PPD in relazione al PMV [5]

Si vede in [figura 3](#) che, anche per $PMV = 0$, la percentuale di insoddisfatti è pari al 5%, ovvero è impensabile individuare condizioni ambientali che siano di comfort per tutti.

Infatti, numerosi studi sul comfort termico hanno considerato irragionevole aspettarsi che tutti siano soddisfatti in un ambiente controllato centralmente. Preferenze termiche non neutre sono comuni, mettendo in discussione la neutralità termica proposta come l'unica condizione termica ottimale per le persone. Inoltre, valori molto bassi e molto alti di PMV non rappresentano sempre uno stato di disagio.

1.2.3. Approccio del comfort adattivo

L'approccio del comfort adattivo, sviluppato da Humphreys et al. (2016) e de Dear e Brager (1998), ha analizzato i dati degli studi sul campo in edifici naturalmente ventilati. Attraverso modelli empirici che correlano le temperature interne confortevoli con le temperature esterne, hanno scoperto che le temperature interne considerate più confortevoli aumentavano significativamente nei climi più caldi e diminuivano nei contesti più freddi. Questo indica che le persone hanno un'abilità intrinseca ad adattarsi

alle variazioni stagionali delle condizioni ambientali, rivelando così che la soddisfazione con l'ambiente termico non implica necessariamente un ambiente limitato a una temperatura interna invariabile [6].

1.2.4. Modelli di comfort personalizzati

I modelli di comfort personalizzati sono stati creati per superare le restrizioni dei modelli PMV e dei modelli adattivi. Invece di basarsi su una risposta media di un gruppo, un modello personalizzato si focalizza sui dati termici di una singola persona. Questo approccio permette di comprendere meglio le esigenze specifiche di comfort e di individuare eventuali problemi. Le informazioni raccolte guidano la progettazione degli ambienti termici per migliorare sia il comfort che l'efficienza energetica. Quando i sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento sono utilizzati in spazi condivisi, i modelli personalizzati possono essere utilizzati per sviluppare soluzioni consensuali, automatizzare il controllo del comfort personale o creare profili di comfort termico per uso generale. Nei singoli spazi occupati da una persona, questi modelli possono essere impiegati per automatizzare con precisione qualsiasi sistema di condizionamento, offrendo vantaggi specialmente a individui con particolari esigenze di comfort termico, come anziani o persone con disabilità. Inoltre, questi modelli possono essere adattati in base ai feedback e alle caratteristiche specifiche di ciascun individuo, consentendo una gestione più dinamica del comfort e migliorando l'affidabilità complessiva del sistema [5].

1.2.5. Discomfort locale

Come detto, gli indici esaminati (PMV e PPD) danno una valutazione del comfort in funzione dei valori medi delle variabili ambientali, cioè, valutano il “comfort globale”. Le condizioni $-0,5 < \text{PMV} < +0,5$ e $5\% < \text{PPD} < 10\%$ rappresentano pertanto condizioni necessarie ma non sufficienti per il comfort: perché ci sia effettivamente comfort deve essere anche nullo il discomfort dovuto a disuniformità delle variabili ambientali, cioè non deve esserci “discomfort locale” che invece, nella valutazione degli ambienti termici è spesso trascurato; infatti, molti professionisti che operano nel settore del microclima non ne tengono conto, ritenendo, in maniera assolutamente errata, che la valutazione termica di un ambiente si esaurisca con la determinazione del valore del PMV [7].

Elevata differenza verticale di temperatura

Generalmente negli ambienti chiusi esiste un gradiente verticale della temperatura dell'aria: in particolare la temperatura in prossimità del soffitto è maggiore di quella al pavimento. Questa differenza, oltre a comportare un maggior consumo di energia (nel caso di ambiente riscaldato), può comportare una sensazione di discomfort locale per i soggetti che possono avvertire più caldo alla testa che ai piedi. In [figura 4](#) è riportato un diagramma che permette di ricavare la percentuale di insoddisfatti da differenza verticale della temperatura dell'aria, in funzione della differenza tra la temperatura dell'aria a livello della testa e quella a livello delle caviglie per persona seduta, ovvero tra 1,1 m e 0,1 m dal pavimento [7].

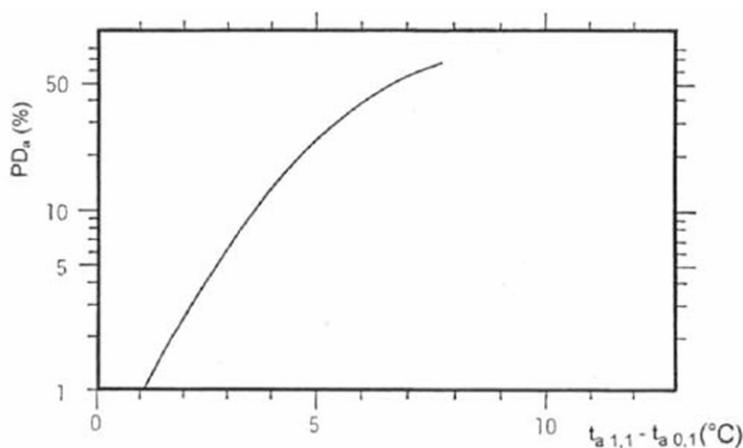


Figura 4: percentuale di insoddisfatti in funzione della differenza tra la temperatura dell'aria a livello della testa e quella a livello delle caviglie [7]

Pavimento troppo caldo o troppo freddo

La temperatura del pavimento ha una doppia influenza sulla sensazione termica: da una parte è determinante ai fini del valore della temperatura media radiante, dall'altra può causare discomfort locale ai piedi. Il discomfort è influenzato inoltre dal tipo di scarpe e di calze indossate dalla persona. Per la UNI-EN-ISO 7730, in inverno, per persone con scarpe e calze idonee, sono accettabili valori della temperatura del pavimento comprese tra 18 e 26 °C (si può arrivare a 29 °C per pavimenti riscaldati), limiti ai quali corrisponde una percentuale di insoddisfatti, del 10%. Per la stagione estiva non esiste alcun limite [7].

Correnti d'aria

Il discomfort da corrente d'aria è definito come un indesiderato raffreddamento locale del corpo umano, causato dal movimento dell'aria. È un problema molto delicato e dibattuto; delicato perché spesso sono proprio le correnti d'aria la causa del discomfort, soprattutto negli ambienti provvisti di impianti di climatizzazione con ventilazione forzata e nei mezzi di locomozione (auto, treni, ecc.); dibattuto perché sono in corso molte ricerche e forse non si sono ancora ottenuti risultati definitivi.

Sperimentalmente si è verificato che la sensazione di discomfort da corrente d'aria è influenzata:

- dal valore massimo e dalle fluttuazioni della velocità, che sono ben rappresentati dal valore medio e dall'intensità di turbolenza;
- dalla temperatura della corrente (al crescere della temperatura diminuisce il discomfort);
- dalla zona del corpo che viene investita dalla corrente (le zone più sensibili sono testa, collo, spalle e caviglie);
- dall'attività del soggetto (la sensibilità delle persone alle correnti d'aria diminuisce al crescere dell'attività) [7].

Elevata asimmetria della temperatura media radiante

L'asimmetria della temperatura radiante è la differenza tra le temperature piane radianti, misurate sulle due facce opposte di un elemento piano. Nel caso degli ambienti reali non isotermi, la temperatura piana radiante dipende dalla posizione della faccia dell'elemento. Si pensi ad un ambiente in cui ci sia un caminetto: se la faccia dell'elemento piano è rivolta verso il caminetto, il flusso termico incidente è certamente più elevato che se la faccia fosse rivolta per esempio verso il soffitto o verso il pavimento o verso un'altra zona dell'ambiente (ed è tanto più elevato quanto più l'elemento è vicino al caminetto).

Il discomfort da asimmetria media radiante si verifica raramente e solo nella stagione invernale. In pratica la causa può essere la presenza di una o più superfici esterne vetrate o di un impianto di riscaldamento a soffitto. La norma UNI-EN-ISO 7730:

- per attività leggera, quasi sedentaria, con finestre o superfici verticali fredde, limita l'asimmetria in direzione orizzontale, valutata rispetto a un elemento piano disposto verticalmente a 0,6 m dal pavimento, a 10 °C, valore al quale corrisponde una percentuale di insoddisfatti del 5%,
- per attività leggera, quasi sedentaria, con soffitto riscaldato, limita l'asimmetria in direzione verticale, valutata rispetto a un elemento piano disposto orizzontalmente a 0,6 m dal pavimento, a 5 °C, valore al quale corrisponde ancora una percentuale di insoddisfatti del 5% [7].

1.3. Ventilazione

Lo scopo della ventilazione è quindi quello di introdurre aria pulita in un ambiente ed espellere quella contaminata nel modo più efficace possibile.

Il regolamento americano ASHRAE 62-1:2010 definisce la ventilazione come “il processo di immissione e/o estrazione d'aria da e/o verso un ambiente confinato al fine di controllare i livelli di inquinanti, l'umidità o la temperatura,” mentre la UNI EN 12792 la descrive come “processo di immissione ed estrazione di aria in e da un ambiente”.

1.3.1. Efficienza di ventilazione

L'efficienza di ventilazione dipende da molti fattori quali: il tipo di ventilazione, la temperatura dell'aria immessa e dell'aria ambiente, le portate d'aria, la posizione degli inquinanti, ecc.

Teoricamente se l'aria immessa fosse completamente mescolata con quella dell'ambiente, la concentrazione dei contaminanti sarebbe uniforme in ogni punto dello spazio: questa situazione è molto rara nella realtà, motivo per cui è stato introdotto il concetto di efficienza della ventilazione [8].

Questo parametro indica quanto velocemente un inquinante viene rimosso dall'ambiente, ed è definito dalla seguente relazione:

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s} \quad \text{dove:}$$

- C_e = concentrazione dell'inquinante nell'aria espulsa
- C_i = concentrazione dell'inquinante nel punto i-esimo considerato
- C_s = concentrazione dell'inquinante nell'aria immessa.

Nel caso di miscelazione perfetta si ha $\varepsilon_v = 1$.

Se la qualità dell'aria nella zona di respirazione è superiore a quella all'estrazione, allora $\varepsilon_v > 1$ e la portata può essere ridotta per ottenere la stessa qualità dell'aria; se invece la qualità dell'aria nella zona di respirazione è inferiore a quella all'estrazione, $\varepsilon_v < 1$ e la portata deve essere aumentata [8].

1.3.2. Tasso di ricambio d'aria

La quantità di aria da introdurre o estrarre da un ambiente può essere espressa in vari modi: come portata d'aria per persona (l/s per persona), per unità di superficie (l/s per m²) oppure in termini di volumi d'aria dell'ambiente per unità di tempo (h⁻¹), definendo il cosiddetto tasso di ricambio d'aria [8].

Questo indice (n) è il rapporto tra la portata d'aria che entra in uno spazio e il volume dello stesso spazio, ed è definito quindi come:

$$n = \frac{q}{V} \quad \text{dove:}$$

- n = tasso di ricambio orario (h⁻¹)
- q = portata d'aria (m³/h)
- V = volume interno dell'ambiente (m³)

1.3.3. Ventilazione naturale

Aerazione

Per aerazione si intende l'apertura manuale delle finestre da parte degli utenti per rinnovare l'aria dell'ambiente attraverso l'immissione di aria esterna. Questa tecnica non è vantaggiosa per diversi motivi: le dispersioni di energia sono elevate, l'ingresso di aria esterna non filtrata introduce gli inquinanti presenti all'esterno e, inoltre, non è possibile controllare con precisione le portate d'aria. In generale, può essere fatta per ventilazione frontale o passante [8].

- Ventilazione frontale: il ricambio dell'aria nell'ambiente avviene tramite un'apertura che consente contemporaneamente l'ingresso e l'uscita di una determinata quantità d'aria, generata dall'effetto del vento e dalle forze ascensionali prodotte dall'aria calda. Infatti, quando la temperatura interna è

superiore a quella esterna, l'ingresso di aria fredda dal basso causa l'uscita di aria calda dall'alto.

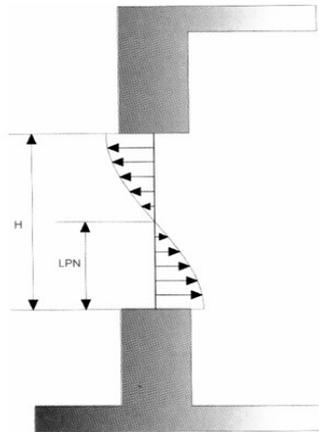


Figura 5: ventilazione frontale

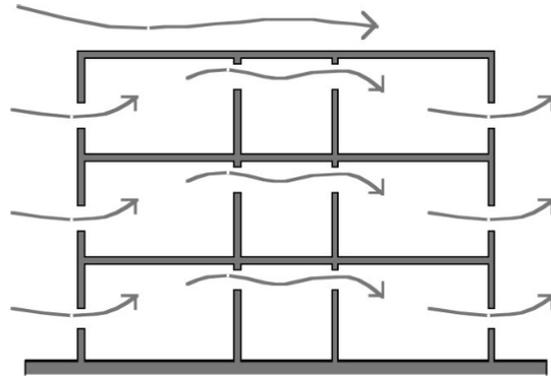


Figura 6: ventilazione passante

- Ventilazione passante: l'azione del vento genera dei gradienti di pressione sulle facciate degli edifici, positivi sopravvento e negativi sottovento. Nel caso di apertura dei serramenti sui due prospetti si genera un moto dell'aria passante attraverso gli ambienti.

Infiltrazione attraverso l'involucro

Si definisce permeabilità di un edificio la portata d'aria di infiltrazione attraverso l'involucro edilizio per unità di superficie, in corrispondenza alla differenza di pressione di riferimento della prova, pari solitamente a 50 Pa [8].

Questa definizione, tratta dalla norma UNI EN 13829:2002 indica dei possibili indici per descrivere la tenuta all'aria di un edificio, che risultano essere quindi:

- la portata d'aria di infiltrazione prodotta da una differenza di pressione indotta (50 Pa – UNI EN 13829),
- il tasso di ricambio d'aria corrispondente a una differenza di pressione pari a 50 Pa (n_{50}),
- l'area di infiltrazione effettiva ed equivalente.

In modo empirico, questi parametri possono essere ottenuti utilizzando la tecnica dei gas traccianti, che è raramente impiegata a causa dei suoi costi elevati e della necessità di personale altamente specializzato, oppure attraverso un metodo chiamato “*blower door test*”. Senza entrare nei dettagli della procedura (la letteratura sull'argomento è molto

vasta), si descrive a grandi linee lo svolgimento del test, che consente di valutare il tasso di infiltrazione attraverso la permeabilità dell'involucro:

Un ventilatore assiale ha il compito di imporre una differenza di pressione prefissata, di solito 50 Pa, raggiunta con diversi passaggi, tra l'ambiente esterno e interno, immettendo o estraendo una certa quantità d'aria: per fare ciò, il ventilatore deve essere montato a tenuta nel vano di una porta o finestra. La prova deve essere eseguita sia in pressione che in depressione e, per una corretta esecuzione, tutte le porte interne devono rimanere aperte mentre quelle esterne e le finestre devono essere chiuse. Numerosi sono i vantaggi per un edificio con un'elevata tenuta all'aria, come la riduzione dei consumi energetici, l'aumento dell'isolamento acustico, l'eliminazione delle correnti d'aria e, non da ultimo, la riduzione della concentrazione di radon quando l'edificio è ben impermeabilizzato al suolo [8].

Infiltrazione attraverso i serramenti

Il contributo degli infissi alla portata di infiltrazione d'aria negli edifici non è trascurabile. Tuttavia è evidente che le infiltrazioni attraverso i serramenti non sono sufficienti a garantire una ventilazione adeguata, soprattutto nelle nuove costruzioni dove si utilizzano infissi ad elevato grado di tenuta. La norma UNI EN 12207:2000 ("Finestre e porte: Permeabilità all'aria - Classificazione") definisce la classificazione degli infissi basata sul confronto tra la permeabilità all'aria del campione sottoposto a prova riferita all'intera area e la permeabilità all'aria riferita alla lunghezza dei lati apribili; vengono definite 4 classi in ordine decrescente di permeabilità ([tabella 1](#) e [tabella 2](#)) [8].

Classe	Permeabilità all'aria di riferimento a 100 Pa m^3/hm^2	Pressione massima di prova Pa
0	Non sottoposto a prova	
1	50	150
2	27	300
3	9	600
4	3	600

Tabella 1: permeabilità all'aria di riferimento a 100 Pa e alle pressioni massime di prova, in rapporto alle superfici totali (da UNI EN 12207:2000) [8]

Classe	Permeabilità all'aria di riferimento a 100 Pa m ³ /hm	Pressione massima di prova Pa
0	Non sottoposto a prova	
1	12,50	150
2	6,75	300
3	2,25	600
4	0,75	600

Tabella 2: permeabilità all'aria di riferimento a 100 Pa e alle pressioni massime di prova, in rapporto alla lunghezza dei lati apribili (da UNI EN 12207:2000) [8]

Il grafico di [figura 7](#) permette di valutare, a determinate pressioni agenti sull'infisso, la portata d'aria infiltrata, per unità di superficie totale o per unità di lunghezza di lati apribili.

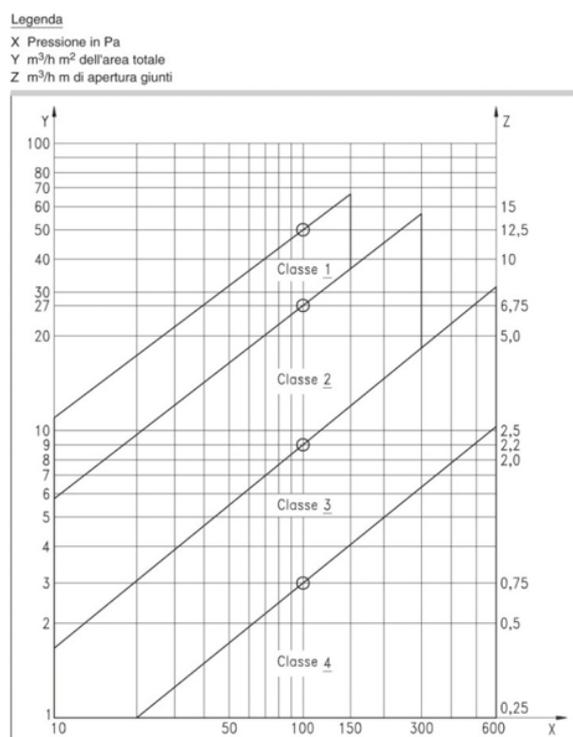


Figura 7: classificazione e portate d'aria di infiltrazione (da UNI EN 12207:2000) [8]

Effetto del vento

Si è visto che, per un edificio sottoposto all'azione del vento, si assiste ad un incremento di pressione sul lato sopravvento e contemporaneamente ad una diminuzione di pressione sul lato sottovento. Questa differenza di pressione tra interno ed esterno dell'edificio è tale da generare un moto di aria dalle zone sopravvento a quelle sottovento e può essere calcolata attraverso la seguente equazione:

$$\Delta_{pv} = 0.5 C_p \rho v^2 \quad (8) \quad \text{dove:}$$

- Δ_{pv} = differenza di pressione tra interno ed esterno indotta dal vento (Pa)
- C_p = coefficiente di pressione
- ρ = densità dell'aria (kg/m^3)
- v = velocità del vento valutata alla quota di gronda dell'edificio (m/s)

La velocità del vento non è uniforme con l'aumentare dell'altezza, ma segue un andamento parabolico, che si annulla in prossimità del suolo a causa dell'attrito dovuto alla rugosità del terreno. Solitamente, tra i dati meteorologici, è possibile trovare la velocità dell'aria a 10 metri di altezza, che viene opportunamente corretta in relazione all'altezza dell'edificio, alla topografia e alla rugosità del terreno [8].

Il coefficiente C_p descrive la distribuzione della pressione indotta dal vento sulle superfici dell'edificio. In [tabella 3](#) sono riportati alcuni valori di questo parametro, valutati per 16 diverse direzioni del vento rispetto alla normale alla superficie incidente: $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ, 180^\circ, 202.5^\circ, 225^\circ, 247.5^\circ, 270^\circ, 292.5^\circ, 315^\circ, 337.5^\circ$ per edifici alti fino a tre piani.

N.	Superficie	R	Esposizione	C_p
1	Muro	1:1	E	0.7, 0.525, 0.35, -0.075, -0.5, -0.45, -0.4, -0.3, -0.2, -0.3, -4, -0.45, -0.5, -0.075, 0.35, 0.525
2	Tetto, p. > 10°	1:1	E	-0.8, -0.75, -0.7, -0.65, -0.6, -0.55, -0.5, -0.45, -0.4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.6, -0.65, -0.7, -0.75
3	Tetto, p. > 10-30°	1:1	E	-0.4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.6, -0.55, -0.5, -0.45, -0.4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.6, -0.55, -0.5, -0.45
4	Tetto, p. > 30°	1:1	E	-0.3, -0.35, -0.4, -0.5, -0.6, -0.5, -0.4, -0.45, -0.5, -0.45, -0.4, -0.5, -0.6, -0.5, 0.4, 0.35
5	Muro	1:1	SE	0.4, 0.25, 0.1, -0.1, -0.3, -0.325, -0.35, 0.275, -0.2, -0.275, -0.35, -0.325, -0.3, -0.1, 0.1, 0.25
6	Tetto, p. < 10°	1:1	SE	-0.8, -0.55, -0.5, -0.45, -4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.6, -0.55, -0.6, -0.55, -0.5, -0.45, -0.4, -0.45, -0.5, -0.55
7	Tetto, p. 10-30°	1:1	SE	-0.35, -0.4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.5, -0.45, -0.4, -0.35, -0.4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.5, -0.45, -0.4
8	Tetto, p. > 30°	1:1	SE	-0.3, -0.4, -0.5, -0.55, -0.6, -0.55, -0.5, -0.5, -0.5, -0.5, -0.5, -0.55, -0.6, -0.55, -0.5, 0.4
9	Muro	1:1	S	0.2, 0.125, 0.05, 0.1, -0.25, -0.275, -0.3, -0.275, -0.25, -0.275, -0.3, -0.275, -0.25, -0.1, 0.05, 0.125
10	Tetto, p. < 10°	1:1	S	-0.5, -0.5, -0.5, -0.45, -0.4, -0.45, -0.5, -0.5, -0.5, -0.5, -0.5, -0.45, -0.4, -0.45, -0.5, -0.5
11	Tetto, p. 10-30°	1:1	S	-0.3, -0.35, -0.4, -0.45, -0.5, -0.45, -0.4, -0.35, -0.3, -0.35, -0.4, -0.45, -0.5, -0.45, -0.4, -0.35
12	Tetto, p. > 30°	1:1	S	0.25, -0.025, -0.3, -0.4, -0.5, -0.4, -0.3, -0.35, -0.4, -0.35, -0.3, -0.4, -0.5, -0.4, -0.3, -0.025
13	Muro lungo	2:1	E	0.5, 0.375, 0.25, -0.125, -0.5, -0.65, -0.8, -0.75, -0.7, -0.75, -0.8, -0.65, -0.5, -0.125, -0.25, -0.375
14	Muro corto	1:2	E	-0.9, -0.35, 0.2, 0.4, 0.6, 0.4, 0.2, -0.35, -0.9, -0.75, -0.6, -0.475, -0.35, -0.475, -0.6, -0.75
15	Tetto, p. < 10°	2:1	E	-0.7, -0.7, -0.7, -0.75, -0.8, -0.75, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.75, -0.8, -0.75, -0.7, -0.7
16	Tetto, p. 10-30°	2:1	E	-0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.65, -0.6, -0.55, -0.5, -0.55, -0.6, -0.65, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7
17	Tetto, p. > 30°	2:1	E	0.25, 0.125, 0, -0.3, -0.6, -0.75, -0.9, -0.85, -0.8, -0.85, -0.9, -0.75, -0.6, -0.3, 0, 0, 0.125
18	Muro lungo	2:1	SE	0.5, 0.375, 0.25, 0, -0.5, -0.65, -0.8, -0.75, -0.7, -0.75, -0.8, -0.65, -0.5, -0.125, 0.25, 0.375
19	Muro corto	1:2	SE	-0.9, -0.35, 0.2, 0.4, 0.6, 0.4, 0.2, -0.35, -0.9, -0.75, -0.6, -0.475, -0.35, -0.475, -0.6, -0.75
20	Tetto, p. < 10°	2:1	E	-0.7, -0.7, -0.7, -0.75, -0.8, -0.75, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.75, -0.8, -0.75, -0.7, -0.7
21	Tetto, p. 10-30°	2:1	E	-0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.65, -0.6, -0.55, -0.5, -0.55, -0.6, -0.65, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7
22	Tetto, p. > 30°	2:1	E	0.25, 0.125, 0, -0.3, -0.6, -0.75, -0.9, -0.85, -0.8, -0.85, -0.9, -0.75, -0.6, -0.3, 0, 0, 0.125
23	Muro lungo	2:1	S	0.05, -0.05, -0.12, -0.16, -0.2, -0.29, -0.38, -0.34, -0.3, -0.34, -0.38, -0.29, -0.2, -0.16, -0.12, -0.05
24	Muro corto	1:2	S	-0.3, -0.075, 0.15, 0.165, 0.18, 0.165, 0.15, -0.075, -0.3, -0.075, 0.15, 0.165, 0.18, 0.165, 0.15, -0.075
25	Tetto, p. < 10°	2:1	S	-0.49, -0.475, -0.46, -0.435, -0.41, -0.435, -0.46, -0.475, -0.49, -0.475, -0.46, -0.435, -0.41, -0.435, -0.46, -0.475
26	Tetto, p. 10-30°	2:1	S	-0.49, -0.475, -0.46, -0.435, -0.41, -0.435, -0.46, -0.43, -0.4, -0.43, -0.46, -0.435, -0.41, -0.435, -0.46, -0.475
27	Tetto, p. > 30°	2:1	S	0.06, -0.045, -0.15, -0.19, -0.23, -0.42, -0.6, -0.51, -0.42, -0.51, -0.6, -0.42, -0.23, -0.19, -0.15, -0.045
28	Muro	1:1	E	0.9, 0.7, 0.5, 0.2, -0.1, -0.1, -0.2, -0.2, -0.2, -0.2, -0.1, -0.1, 0.2, 0.5, 0.7
29	Tetto piano	1:1	E	-0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1

Tabella 3: valori del coefficiente di pressione C_p (R= rapporto lunghezza-larghezza, E = esposto, SE = semiesposto, S = schermato) [8]

Effetto camino

Tale effetto è dovuto al gradiente termico esistente tra l'ambiente esterno e quello interno: alla differenza di temperatura è collegata una differenza di densità dell'aria per la quale l'aria all'interno più calda fluisce verso l'alto, richiamando dall'esterno quella più fredda entrante dal basso: questo fenomeno è tanto più accentuato quanto gli ambienti sono alti.

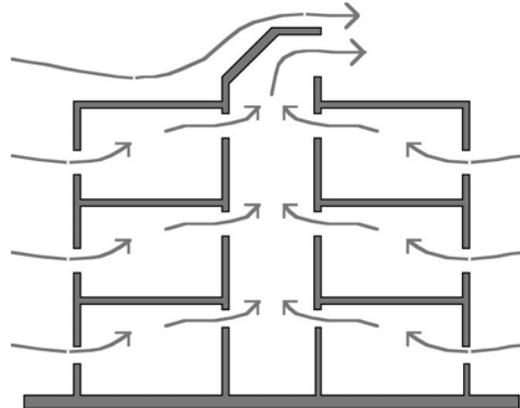


Figura 8: rappresentazione dell'effetto camino

Se si considera un ambiente di notevole altezza dotato di due aperture, una alla base e una in sommità, come illustrato in [figura 8](#), ipotizzando un andamento lineare della pressione assoluta e considerando che negli spazi interni il riscaldamento dell'aria genera una forza ascensionale, è possibile tracciare qualitativamente l'andamento della pressione assoluta interna p_i e quella esterna p_e [8].

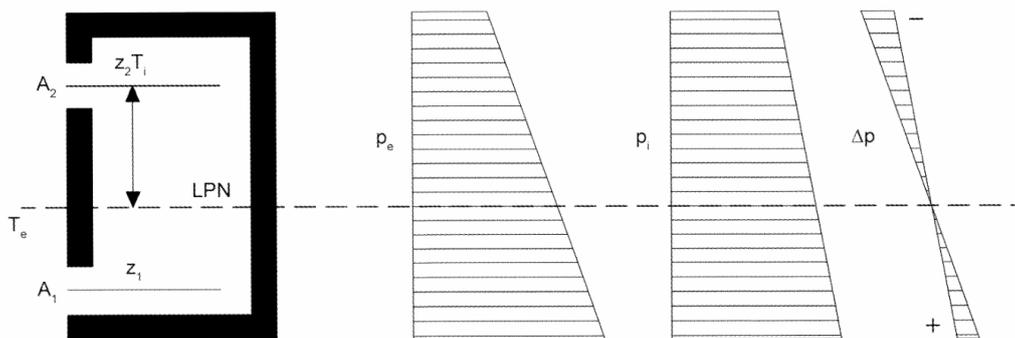


Figura 9: distribuzione della pressione esterna (p_e), della pressione interna (p_i), differenza di pressione tra interno ed esterno (Δp) e posizione del livello di pressione neutra (LPN) in un ambiente di altezza elevata [8]

Le pressioni sono crescenti all'avvicinarsi del suolo per effetto della forza gravitazionale, in maniera minore all'interno rispetto all'esterno per la temperatura maggiore dell'ambiente. In [figura 9](#) è anche mostrato il profilo della differenza di pressione esistente tra interno ed esterno, dal quale risulta come nelle zone inferiori dell'ambiente la pressione esterna sia più elevata di quella interna ($\Delta p > 0$) con conseguente ingresso

dell'aria; nella zona più alta invece, dove la pressione interna è maggiore di quella esterna ($\Delta p < 0$), avviene la fuoriuscita di aria. L'altezza in corrispondenza della quale la differenza di pressione è nulla prende il nome di livello di pressione neutra (LPN): è fondamentale quindi per la realizzazione di aperture per la ventilazione conoscere la posizione di questo livello. Realizzando infatti una finestra al di sopra del LPN si verificherebbe una fuoriuscita di aria mentre aprendone una sotto il LPN si avrebbe solo ingresso di aria [8].

1.3.4. Limiti e vantaggi della ventilazione naturale

Negli ultimi anni, c'è stato un crescente interesse per la ventilazione naturale, probabilmente motivato dall'idea di "sostenibilità" e risparmio energetico, ma anche dall'opportunità di stabilire un rapporto più diretto con l'ambiente esterno, senza l'interferenza di sistemi impiantistici complessi. Come discusso nei paragrafi precedenti, la ventilazione naturale si basa sull'effetto del vento e sull'effetto camino. Tuttavia, la sua dipendenza dalle condizioni climatiche esterne rende difficile il calcolo delle portate di ventilazione e, in assenza di differenze di temperatura o di vento, la circolazione dell'aria tende a diminuire. In aree con elevata densità abitativa, la presenza di edifici circostanti può limitare il movimento dell'aria, riducendo l'efficacia del sistema di ventilazione naturale. La velocità del vento ha scarso impatto sul funzionamento interno poiché è necessario limitare la velocità dell'aria negli ambienti. Inoltre, la legislazione sconsiglia l'uso della ventilazione naturale nei condomini per rispettare i limiti sull'isolamento acustico tra le unità abitative, limitandone l'applicazione agli edifici monofamiliari. Dal punto di vista costruttivo, l'installazione della ventilazione naturale è relativamente semplice per gli edifici residenziali: è sufficiente avere dispositivi o aperture per l'ingresso collegati all'esterno e griglie per l'uscita dell'aria connesse a camini a tiraggio naturale. Questa semplicità costruttiva la rende una scelta attraente per molti progetti edilizi, specialmente quelli orientati verso la sostenibilità e il risparmio energetico [8].

1.3.5. Ventilazione meccanica

Attraverso questa tecnica, il ricambio d'aria necessario negli ambienti è garantito da una rete impiantistica che include uno o più ventilatori per la movimentazione meccanica dell'aria. Il principio fondamentale della ventilazione meccanica è l'introduzione di aria pulita nelle aree della casa in cui le persone trascorrono la maggior parte del tempo (come soggiorno e camere da letto), mentre l'aria "viziata" viene estratta dai locali considerati "sporchi" (come bagni e cucine), dove si genera una notevole quantità di vapore acqueo e CO₂.

Esistono principalmente due tipologie di impianti che si distinguono per le dimensioni delle reti aerauliche: sistemi a semplice estrazione e sistemi a flusso bilanciato (come mostrato nella [figura 10](#)). Nei primi, c'è solo una rete di estrazione con un ventilatore che, tramite aspirazione, richiama aria fresca attraverso appositi dispositivi installati di solito negli infissi. I sistemi a flusso bilanciato, invece, richiedono sia una rete di estrazione che una di immissione, rendendo la loro realizzazione più complessa; tuttavia, hanno il vantaggio di poter recuperare il calore dall'aria estratta tramite recuperatori di calore, contribuendo così in modo significativo al risparmio energetico [8].

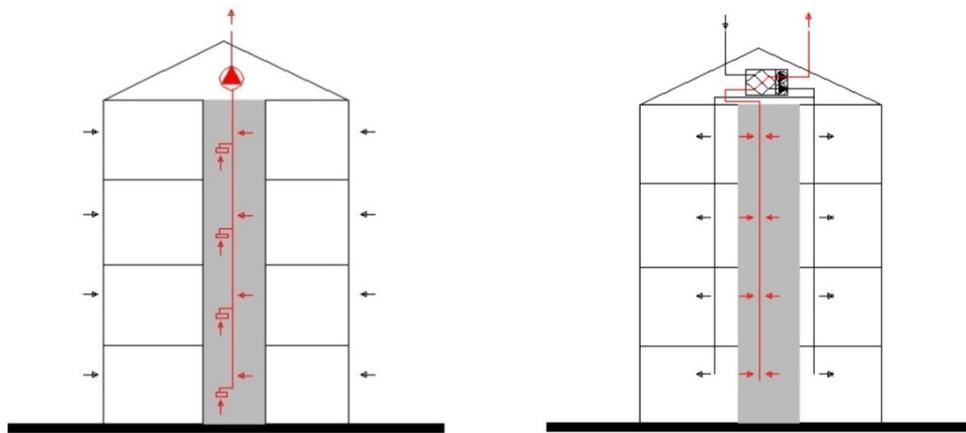


Figura 10: schema di ventilazione meccanica a semplice estrazione (a sinistra) e a destra a flusso bilanciato [8]

In generale, i sistemi di ventilazione meccanica offrono un notevole vantaggio rispetto alle tecniche di ventilazione naturale poiché consentono un controllo preciso sulle portate d'aria, che possono essere costanti o variabili a seconda del tipo di impianto. Questa capacità è estremamente utile per ridurre la presenza di contaminanti indoor e prevenire la formazione di muffe, assicurando al contempo l'introduzione di aria pulita e filtrata.

Sistemi a semplice estrazione

Questo è il sistema più diretto e immediato di ventilazione meccanica: l'aria viene estratta tramite ventilatori che la aspirano attraverso apposite aperture di ingresso chiamate bocchette di estrazione.

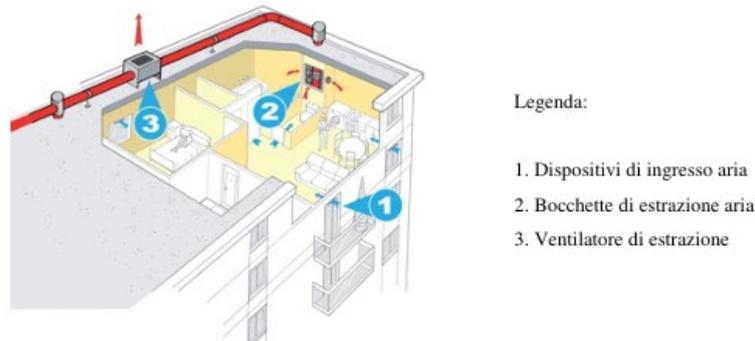


Figura 11: sistema di ventilazione meccanica a semplice flusso per abitazioni collettive [8]

Esistono due tipologie principali:

- Sistemi a portata fissa: la portata d'aria è costante grazie all'adozione di dispositivi di regolazione auto azionati che possono essere installati a livello di cassonetto o di infisso;
- Sistemi a portata variabile: la variabilità della portata è garantita con il controllo della velocità del ventilatore che può avvenire o manualmente, collegandolo ad esempio con un interruttore (molto spesso nei bagni è associato all'interruttore della luce) o automaticamente, utilizzando dei sensori di umidità e di CO₂, un esempio è costituito dagli ingressi di aria igroregolabili, che lavorano in funzione dell'umidità relativa interna [8].

Sistemi bilanciati

Si distinguono dai sistemi a semplice estrazione per la presenza di una doppia rete aeraulica: una per l'aria di rinnovo da introdurre nei soggiorni e nelle camere da letto e un'altra per l'estrazione che avviene nei bagni e nelle cucine, ognuna dotata del proprio ventilatore. Il termine "bilanciata" indica un'equivalenza tra la portata di immissione e quella di estrazione, anche se nella pratica si mantiene una leggera sovrappressione nell'intero alloggio per impedire l'ingresso di odori o inquinanti dall'esterno.

Le migliori performance di questo sistema si raggiungono con l'introduzione nell'impianto di un recuperatore di calore, statico o termodinamico. Negli ultimi tempi si stanno diffondendo i cosiddetti sistemi SRHR (*Single Room Heat Recovery*) che evitano la posa di reti aerauliche con recupero di calore per singolo ambiente [8].

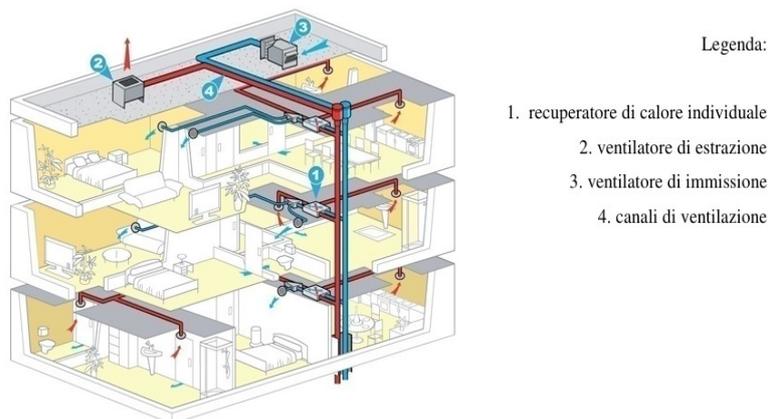


Figura 12: schema di sistema di ventilazione meccanica bilanciata semi centralizzata per abitazioni collettive [8]

1.3.6. Ventilazione ibrida

I sistemi di ventilazione ibrida combinano i principi della ventilazione naturale con quelli della ventilazione meccanica, come suggerisce il nome stesso. Grazie a dispositivi di controllo automatico, è possibile utilizzare una tecnica o l'altra a seconda delle necessità. Ci sono diverse modalità di utilizzo:

- Ventilazione naturale e meccanica in modo alternato: il sistema di controllo seleziona automaticamente la tecnica di ventilazione più adatta in base alle condizioni ambientali (temperatura, occupazione, stagione).
- Ventilazione naturale assistita: l'impianto di ventilazione naturale è integrato da una rete di estrazione o immissione dell'aria.
- Ventilazione meccanica assistita: gli impianti meccanici di ventilazione sfruttano anche le componenti naturali per ridurre i consumi energetici [8].

1.3.7. Condotti aeraulici

La rete degli impianti di ventilazione è composta da canali a sezione variabile che possono essere realizzati in lamiera di acciaio zincato (a sezione rettangolare o circolare spiralata [\(figura 13\)](#)), in PVC o con condotti flessibili [\(figura 14\)](#)).

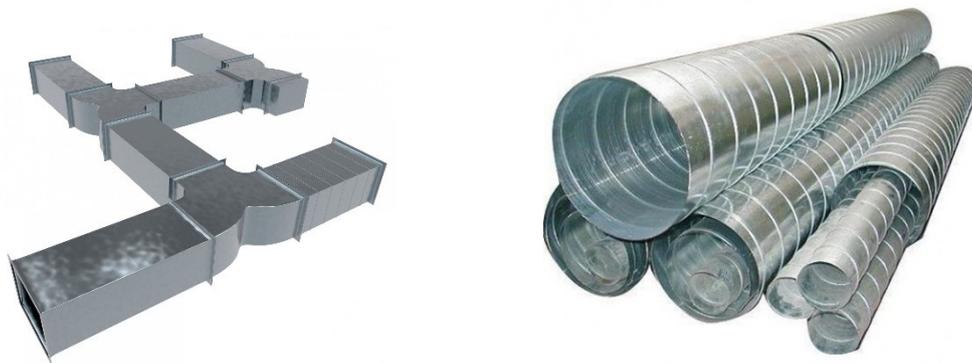


Figura 13: canali in lamiera zincata a sezione rettangolare e circolare spiralata

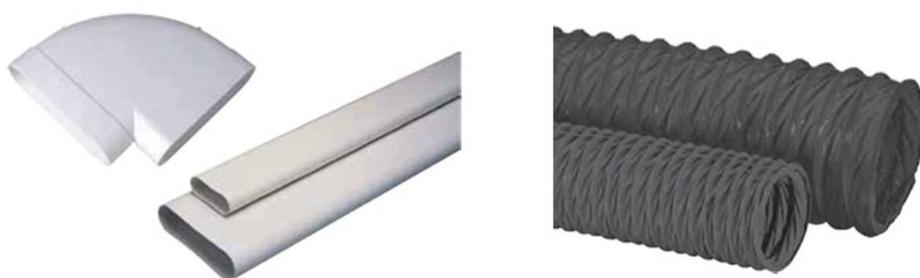


Figura 14: canali in PVC e flessibili

In fase di progettazione è importante contenere le velocità dell'aria nei condotti per evitare problemi di rumore, valutare le perdite di carico, prevedere tutti gli accessori per una corretta installazione della rete (guarnizioni, curve, raccordi, riduzioni, staffe) nonché l'eventuale coibentazione di alcuni tratti dell'impianto [8].

1.3.8. Ventilatori

Hanno il compito di movimentare l'aria all'interno dei canali, fornendole l'energia necessaria per vincere le perdite di carico generate dai canali (distribuite e concentrate) e dai terminali di immissione ed estrazione. Esistono due tipologie principali, centrifughi e assiali, che si differenziano essenzialmente per la direzione del flusso attraverso la girante.



Figura 15: ventilatori centrifughi e assiali

Il ventilatore assiale si avvicina fondamentalmente alla configurazione delle pale di un aereo. L'aria immessa segue una traiettoria parallela all'asse di rotazione e viene scaricata lungo tutta la lunghezza della pala in uscita, mentre nel ventilatore centrifugo l'aria è espulsa dall'interno verso l'esterno, in modo centrifugo. In termini di prestazioni, i ventilatori centrifughi gestiscono portate d'aria moderate ma con alte pressioni statiche, mentre quelli assiali gestiscono grandi volumi d'aria ma con bassa pressione statica. Nei sistemi di ventilazione per edifici residenziali, di solito vengono impiegati i ventilatori centrifughi. Le prestazioni di un ventilatore possono essere visualizzate efficacemente tramite un diagramma di curva caratteristica (vedi [figura 16](#)). Sull'asse delle ascisse è indicata la portata d'aria, mentre sulle ordinate si trova la pressione totale (o in alcuni casi la pressione statica, l'efficienza, la potenza assorbita, ecc.). È possibile individuare sulla curva caratteristica un punto che rappresenta il rendimento massimo del ventilatore, in corrispondenza del quale si ha anche il minore consumo energetico e il livello più basso di emissioni sonore, misurate in dB(A) [8].

In [figura 16](#) l'area colorata in rosa raccoglie tutti i punti in cui il ventilatore possiede caratteristiche insoddisfacenti dal punto di vista del rendimento, dei costi e della rumorosità.

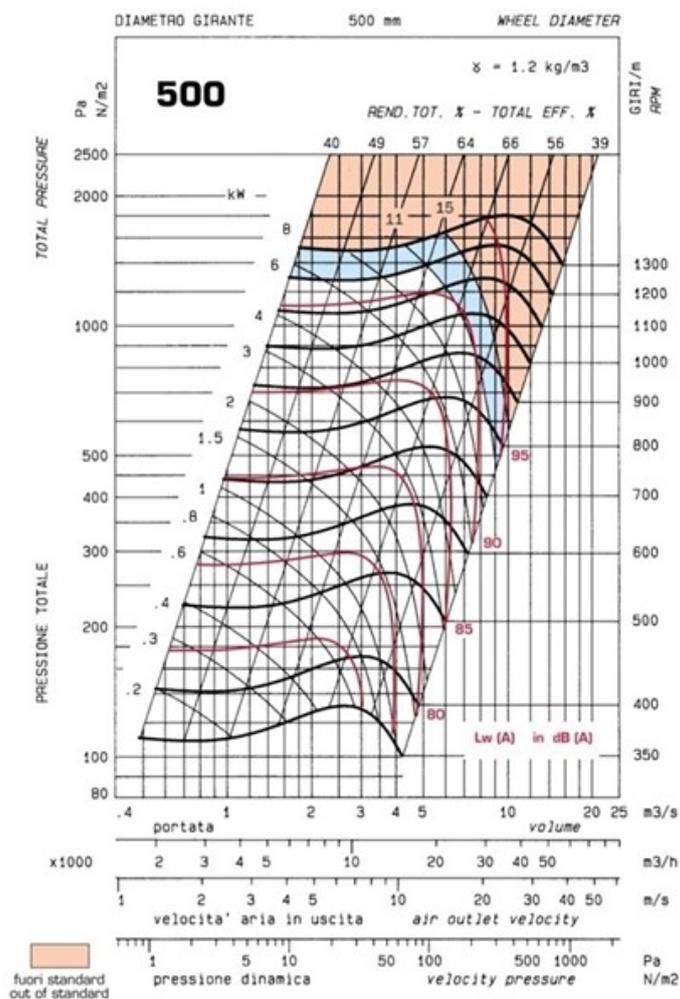


Figura 16: diagramma pressione-portata di un ventilatore centrifugo [8]

La prevalenza del ventilatore è determinata dalla somma della pressione statica e dinamica. La pressione statica è l'energia potenziale utilizzata per poter vincere le resistenze opposte dalla rete al passaggio dell'aria. La pressione dinamica è invece l'energia cinetica che possiede l'aria in movimento e dipende dalla velocità del fluido che esce dalla girante. Il rendimento rappresenta il rapporto tra l'energia fornita dal ventilatore all'aria e l'energia necessaria per azionare il ventilatore [8].

1.3.9. Recuperatori di calore

“Il recuperatore di calore è uno scambiatore di calore o una combinazione di scambiatori di calore, che permette un trasferimento di calore e, in alcuni casi, di umidità tra il flusso di aria di scarico ed il flusso di aria di alimentazione, sotto l’azione di una differenza tra i livelli di temperatura e di umidità. Il recuperatore di calore è generalmente installato in alloggiamenti con adeguati collegamenti ai condotti dell’aria.” Questa è la definizione di recuperatore di calore secondo la norma UNI EN 308:1998, che riguarda i metodi di prova per determinare le prestazioni dei recuperatori aria-aria. I principali recuperatori utilizzati in ambito residenziale sono del tipo a piastre in alluminio, statici e privi di parti in movimento. Il loro funzionamento è molto semplice: il flusso di aria di rinnovo e quello di espulsione, una volta entrati nel recuperatore, vengono suddivisi in passaggi (adeguatamente sigillati per evitare contaminazioni tra i flussi) situati tra due piastre che trasportano rispettivamente aria calda e aria fredda [8].

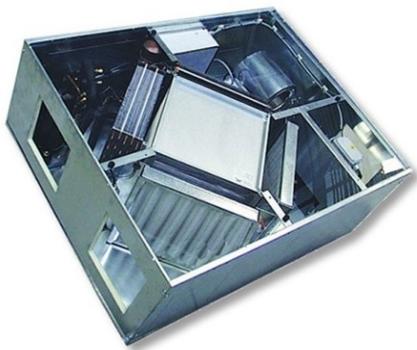


Figura 17: recuperatore di calore a piastre

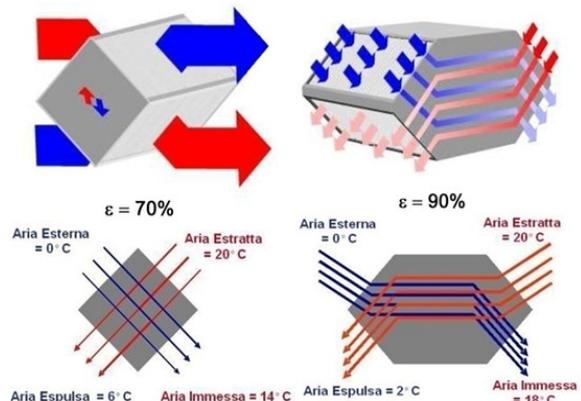


Figura 18: recuperatore a flussi incrociati e controcorrente

Il parametro che caratterizza le prestazioni di un recuperatore è l’efficienza che può essere riferita al calore sensibile, all’entalpia o all’umidità ed è definita come il rapporto tra il flusso termico scambiato tra le due correnti e il massimo flusso termico scambiabile tra esse a parità di temperature di ingresso dei fluidi. L’efficienza è quindi un parametro che dipende dalle portate e dalle temperature in gioco per cui risulta variabile durante l’anno. A seconda della dimensione dello scambiatore i recuperatori si dividono in due tipologie: a flussi incrociati e controcorrente (figura 18). Si differenziano essenzialmente per forma ed efficienze: i recuperatori a flussi incrociati hanno forma quadrata ed efficienze tra il 50 e il 70%. I recuperatori controcorrente hanno forma esagonale, e possono raggiungere anche efficienze superiori al 90% [8].

Il vantaggio del recupero di calore è evidente durante il periodo invernale; tuttavia, potrebbe risultare svantaggioso in estate, quando sarebbe preferibile immettere aria esterna senza preriscaldarla. Per questo motivo, è stato introdotto il by-pass, che consente di evitare che l'aria attraversi il recuperatore, sia automaticamente che manualmente, rinfrescando così i locali durante le ore notturne estive.

Attraverso l'utilizzo di speciali setti divisorii nello scambiatore costituiti da una speciale carta trattata che consente la migrazione di vapore acqueo (dal lato con maggiore a quello con minore umidità), è possibile il recupero di calore totale, sensibile e latente, rimanendo al contempo in dimensioni uguali ai recuperatori di solo calore sensibile.

Tra le altre tipologie di recuperatori si ricordano quello rotativo e quello termodinamico. Il recuperatore di tipo rotativo ([figura 19](#) sinistra) è costituito da un rotore realizzato in lamiera pieghettata a cui, nella rotazione, l'aria espulsa cede il proprio calore che viene, nel suo movimento ceduto a sua volta all'aria di rinnovo e così via. Il recuperatore di calore termodinamico ([figura 19](#) destra) include al suo interno una pompa di calore che permette di preriscaldare l'aria ad una temperatura superiore a quella ambiente [8].



Figura 19: recuperatore rotativo e termodinamico

1.3.10. Attenuatori acustici

La turbolenza generata dalle pale del ventilatore è una fonte di rumore che si propaga all'interno della rete aeraulica. Per ridurre questo rumore, si utilizzano appositi silenziatori (attenuatori acustici), che possono essere di tipo passivo o attivo.

I silenziatori passivi di forma cilindrica ([figura 20](#)) sono costituiti da un tubo rivestito all'interno da materiale fonoassorbente, ricoperto da una lamina metallica forata.



Figura 20: silenziatore passivo cilindrico

I silenziatori passivi a forma rettangolare ([figura 21](#)) presentano al loro interno pannelli paralleli in materiale assorbente: il loro compito è quello di dividere il flusso di aria in diverse sezioni per avere un maggior contatto tra le onde sonore e il materiale fonoassorbente.



Figura 21: silenziatore passivo rettangolare

I silenziatori attivi sono invece basati su un diverso funzionamento: un microfono posto all'interno dell'attenuatore rileva il rumore emesso dal ventilatore. Un altoparlante a valle emette un rumore con opposta fase e ritardato del tempo che il suono impiega a percorrere lo spazio tra il microfono l'altoparlante, neutralizzando l'onda sonora iniziale.

La differenza tra i silenziatori attivi e passivi consiste nel fatto che i primi hanno maggiore efficienza nel campo delle basse frequenze (caratteristico del rumore emesso dei ventilatori) mentre quelli passivi presentano una maggiore attenuazione con le frequenze medio-alte [8].

1.3.11. Filtri

La filtrazione è possibile quando si è in grado di controllare l'aria di rinnovo, cioè solo nel caso della ventilazione meccanica bilanciata, grazie alla presenza di una rete aeraulica di mandata. Negli altri sistemi, al massimo, si possono dotare i dispositivi di ingresso dell'aria di reti per la protezione dagli insetti.

La scelta tra le varie tipologie di filtri in commercio è fondamentale per ottenere un determinato grado di qualità dell'aria negli ambienti, garantendo così la protezione della salute umana. I materiali più utilizzati sono le fibre di cellulosa, sintetiche, di vetro o in plastica le quali, potendo essere caricate elettricamente, permettono una maggiore efficienza nei confronti delle particelle fini.

È altrettanto fondamentale, negli impianti di ventilazione meccanica, effettuare una manutenzione periodica e accurata per evitare problemi legati al malfunzionamento del sistema e alla qualità dell'aria. Numerosi studi hanno dimostrato che i filtri possono diventare essi stessi fonti di inquinanti, influenzando negativamente sulla qualità dell'aria percepita, sui sintomi legati alla Sindrome dell'Edificio Malato e sulle prestazioni lavorative [8].



Figura 22: filtri in fibra di cellulosa

1.3.12. Batterie di riscaldamento e raffrescamento

Negli impianti di ventilazione, è possibile ottenere una climatizzazione completa utilizzando batterie ad acqua o elettriche. Le batterie ad acqua, che sono scambiatori di calore aria/acqua, vengono realizzate con tubi alettati e sono comunemente impiegate all'interno delle unità di trattamento aria (UTA). Queste batterie sono utilizzate per varie funzioni: preriscaldamento, raffreddamento, deumidificazione e post-riscaldamento dell'aria, consentendo un controllo preciso delle condizioni climatiche interne.

Le batterie elettriche, d'altra parte, sono costituite da resistenze rivestite in acciaio inox e sono dotate di dispositivi di sicurezza contro i surriscaldamenti, come quelli a riarmo automatico. Sebbene il riscaldamento tramite resistenze elettriche non sia vantaggioso dal punto di vista energetico, l'utilizzo di tali soluzioni può essere giustificato se combinato con l'impiego di fonti di energia rinnovabile, come l'energia solare o eolica, che compensano il consumo energetico elevato.

Inoltre, l'integrazione di questi sistemi nei moderni impianti di ventilazione meccanica consente non solo di migliorare la qualità dell'aria interna, ma anche di mantenere condizioni di comfort ottimali durante tutto l'anno, indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne. La capacità di riscaldare, raffreddare e deumidificare l'aria in modo efficiente e controllato rende queste soluzioni particolarmente adatte per edifici residenziali, commerciali e industriali, dove la qualità dell'aria e il comfort termico sono fondamentali per il benessere degli occupanti [8].



Figura 23: batterie di riscaldamento/raffrescamento aria-acqua

1.3.13. Dispositivi per la regolazione della portata

Con l'utilizzo di serrande e moduli di regolazione è possibile andare a regolare la portata d'aria negli ambienti, con sensori di presenza o a comando manuale.

2. Camera climatica

La camera climatica in oggetto si trova presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, nel Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) a quota 160.

La camera è composta da:

- Una struttura portante esterna realizzata in acciaio a traliccio, per conferire resistenza.
- Pannelli isolanti nel soffitto, nelle pareti laterali e nel pavimento; per garantire l'isolamento termo acustico.

L'unico accesso è dato dalla porta, realizzata anch'essa con materiale isolante.

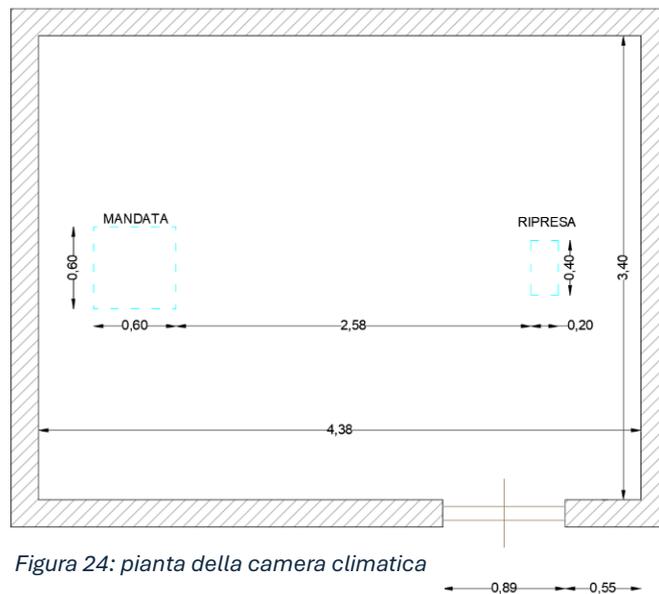


Figura 24: pianta della camera climatica



Figura 25: camera climatica

Il ricambio d'aria all'interno è soddisfatto da un diffusore e una bocchetta installate in corrispondenza di due aperture nel soffitto (vedi [figura 26](#)) e collegate tramite dei condotti aeraulici flessibili ad un sistema di ventilazione meccanica esterno.



Figura 26: diffusore di mandata

Per garantire il riscaldamento/raffrescamento della camera, su due pareti verticali interne sono stati installati pannelli radianti ([figura 27](#) e [figura 28](#)) collegati ad un sistema idraulico esterno con pompa di calore ([figura 29](#)).



Figura 27: pannelli radianti



Figura 28: pannelli radianti



Figura 29: impianto idraulico per pannelli radianti

2.1. Interventi migliorativi

La camera presentava in partenza delle fessure tra le giunzioni di alcuni pannelli del soffitto, del pavimento e negli spigoli tra le pareti; anche la porta non era perfettamente a tenuta.

Al fine di garantire una migliore veridicità nelle prove e ridurre le esfiltrazioni e le infiltrazioni tra l'ambiente interno ed esterno sono stati adottati dei semplici accorgimenti.

2.1.1. Applicazione del nastro a tenuta d'aria

È stato usato il nastro SIGA Sicrall® 60. Come è riportato sulla scheda del prodotto il nastro mono adesivo ad alta prestazione è specifico per sigillare strati a tenuta all'aria in ambienti interni; il nastro è perfetto per sigillare giunti tra pannelli e sovrapposizioni di freni al vapore [9].

Il nastro è stato applicato solo in alcuni punti della camera, ritenuti critici, dove era evidente anche a occhio nudo un eccessivo spazio tra i pannelli e le giunzioni.

		Norme	Unità	Valori
Massa	lunghezza / larghezza lunghezza / larghezza	Sicrall 60 Sicrall 170	m m	40 / 0.06 40 / 0.17
Resistenza alla temperatura			°C	da -40 °C a +100 °C
Temperatura di lavorazione			°C	da -10 °C
Spessore d'aria equivalente s_d		EN 1931	m	8
Tenuta all'aria: Coefficiente di permeabilità dei giunti Permeabilità di riferimento relativa alla lunghezza	a-valore Q ₁₀₀₀ -valore	EN 12114	m ³ /(hmdaPA2/3) m ³ /(mh)	< 0.1 ≤ 0,25
Resistenza all'invecchiamento	elevata capacità di aderenza, non può screpolare, perché privo di caucciù, resina e solvente; si adatta in modo affidabile e duraturo ai movimenti della costruzione			
Capacità di conservazione	illimitata			

Figura 30: scheda tecnica nastro SIGA Sicrall®



Figura 31: applicazione del nastro su intercapedini e fessure

2.1.2. Isolamento della porta

Una considerevole quantità di aria veniva dispersa verso l'esterno a causa di intercapedini presenti tra la porta e il suo telaio, annullando così tutto il lavoro svolto dai pannelli isolanti e dal nastro a tenuta d'aria.

Si è intervenuti procedendo ad incollare sul telaio in alluminio della porta uno strato di plastica espansa (vedi [figura 32](#) e [figura 33](#)), in modo che, facendo battuta con la porta una volta chiusa, si riducesse il passaggio di aria.



Figura 32: plastica espansa incollata nel telaio in alluminio della porta



Figura 33: plastica espansa incollata nel telaio in alluminio della porta

2.2. Setup per la misurazione della CO₂

2.2.1. Sensore Hobo® MX CO2 Logger (MX1102A)

È stato impiegato per la misurazione della CO₂ nella camera climatica, ma rileva anche temperatura e umidità relativa. Il dispositivo, alimentato da batterie, è di forma compatta e non richiede connessioni fisiche esterne durante il suo funzionamento.

Come si evince dalla [figura 34](#) presenta un display LCD per il monitoraggio in tempo reale dei parametri rilevati (CO₂, temperatura e umidità relativa), i relativi sensori, i pulsanti fisici per i comandi, una porta USB per l'acquisizione dei dati e l'alloggiamento per le batterie sul retro.



Figura 34: HOBO® MX CO₂ Logger (MX1102A) [10]

Di seguito viene riportata la scheda tecnica dello strumento, suddivisa per tipo di sensore [10].

Tabella 4: scheda tecnica HOBO® MX CO2 Logger (MX1102A)

CO₂ Sensor

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

Temperature Sensor

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

RH Sensor*

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

Calibrazione HOBO® MX CO2 Logger (MX1102A)

Prima dell'installazione dei sette sensori HOBO® nella camera climatica, è stata fatta la procedura di calibrazione, necessaria per garantire che le misurazioni fornite siano accurate e affidabili.

I sensori sono stati portati all'esterno in un punto riparato da vento, l'uno a fianco all'altro (vedi [figura 35](#)), ed è stata avviata la calibrazione premendo il tasto "calibrate" su ognuno di essi (vedi [figura 34](#)).

Dopo cinque minuti, al termine del lampeggio del display, la procedura può considerarsi conclusa e il sensore risulterà calibrato se il valore di CO₂ riportato sul display sarà inferiore a 500 ppm. In caso contrario, la procedura dovrà essere ripetuta.



Figura 35: sensori HOBO® in fase di calibrazione

Posizionamento HOBO® MX CO2 Logger (MX1102A) nella camera

Per ottenere una rilevazione quanto più dettagliata possibile della distribuzione di CO₂ all'interno della camera si è deciso di posizionare i 7 sensori a disposizione su 3 aste denominate A, B e C, disposte lungo l'asse centrale della camera. Le aste A e C, poste alle estremità della camera, distano 0,50 m dalla parete mentre l'asta B è al centro (vedi [figura 36](#)).

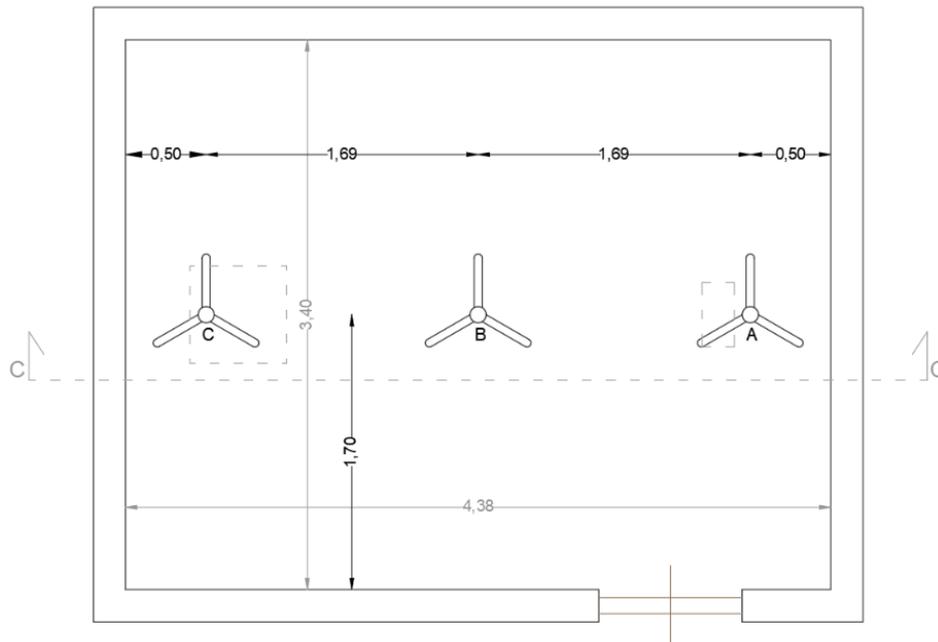


Figura 36: pianta della camera con le aste per il collocamento dei sensori

I sensori sono stati collocati sulle aste a 3 diverse altezze: 0,75 m, 1,50 m, 2,00 m. Dal basso verso l'alto nell'asta A si trovano i sensori 7 e 1, nell'asta B i sensori 5, 12 e 6 e nell'asta C i sensori 4 e 10 (vedi [figura 37](#)).

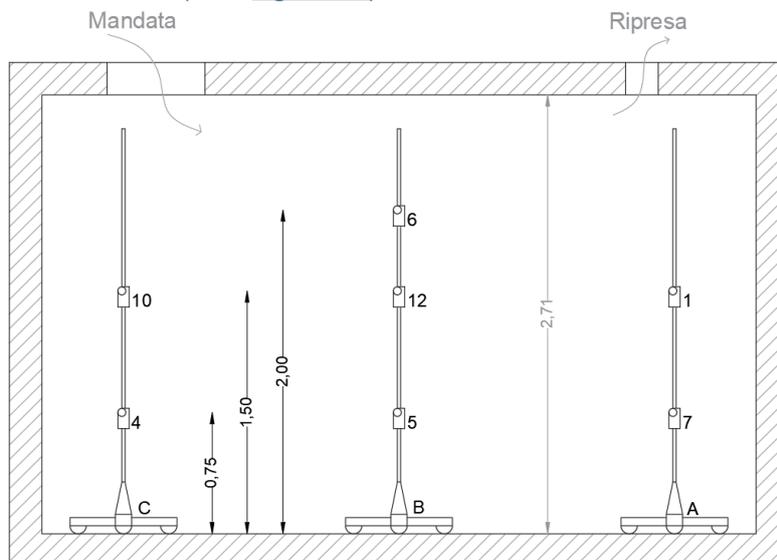


Figura 37: sezione C-C della camera climatica con vista delle aste e relativi sensori

Acquisizione dei dati

La gestione dei dati avviene tramite il software “*HOBObconnect Monitoring App*” (www.onsetcomp.com/products/software/hobobconnect) installato su un computer collegato via Bluetooth ai sensori.

Come si vede dalla [figura 38](#), il software permette il monitoraggio in tempo reale di tutti i parametri misurati (concentrazione di CO₂, temperatura e umidità relativa) da ogni singolo sensore, nonché il salvataggio dei dati in formato Excel (XLSX).

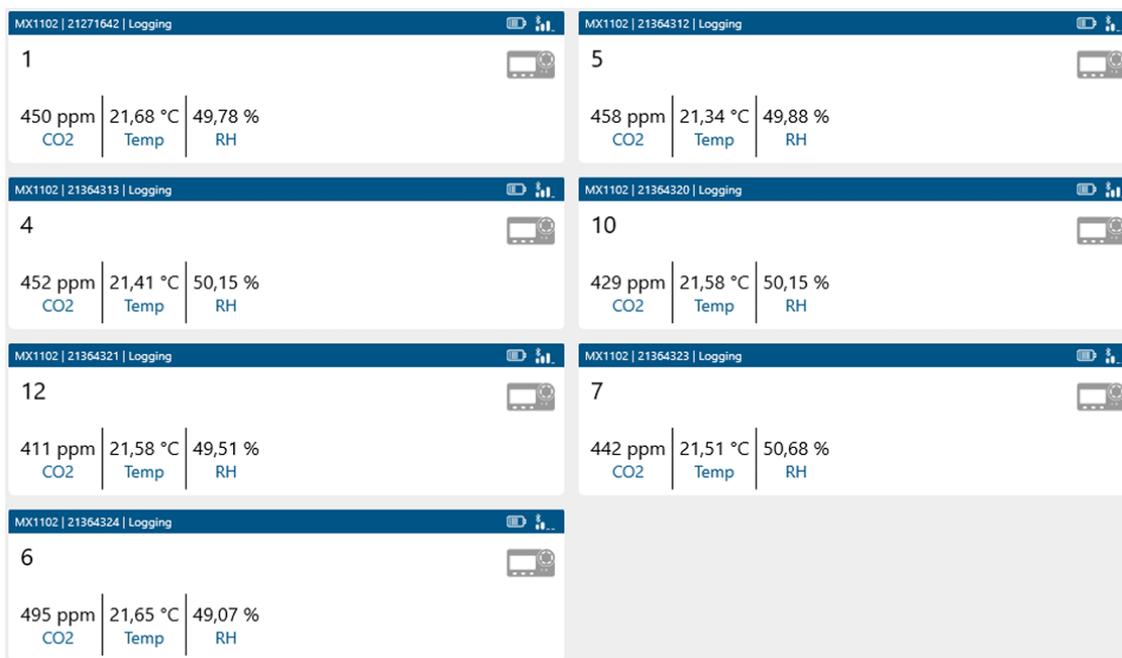


Figura 38: software HOBObconnect per l'acquisizione dei dati

2.2.2. Sensore LSI Lastem BS01031

Oltre ai 7 sensori HOBO[®] citati sopra, per la misurazione della CO₂ è stato utilizzato anche il sensore LSI Lastem BS01031, collegato via cavo per l'alimentazione e l'acquisizione dei dati.



Figura 39: sensore LSI Lastem BS01031

Gas	CO ₂	
Campo di misura	0...5000 ppm	
Principio	Infrarosso (NDIR)	
Soglia detettabile		
Accuratezza (@ 25°C)	±(50 ppm +3% reading)	
Risoluzione	-	
Temperatura operativa	-40...60°C	
Coeff.temperatura	±(1+CO ₂ concentration [ppm] / 1000) ppm/°C (@ -20...45 °C)	
Uscita	0,2...1 V	4...20 mA
Alimentazione	6...9 Vcc	10...30 Vcc/ca
Consumo	120 mA	
Cavo	L=2 m	Non incluso (DWA5xx)
Tempo di risposta (T90)	140 s	
Vita della cella	5 anni	

Figura 40: scheda tecnica LSI Lastem BS01031

Posizionamento LSI Lastem BS01031 nella camera

Il sensore è stato posizionato al centro della camera, vicino all'asta B che supporta i sensori HOBO®, ad un'altezza di 1,50 m da terra (vedi [figura 41](#)). In questo modo è possibile avere un confronto tra quello che misura il sensore LSI e quello che misura l'HOBO® n°12.



Figura 41: a sinistra l'asta con i sensori HOBO® e a destra quella con il sensore Lastem

Acquisizione dati LSI Lastem BS01031

Il monitoraggio in tempo reale del valore di CO₂ e l'acquisizione dei dati avviene tramite software LabVIEW. Come si vede dalla [figura 42](#) è possibile intervenire sul programma andando a variare il tempo di acquisizione (s) o fermando l'acquisizione stessa. Viene poi generato un file di testo con i riferimenti temporali e i valori di CO₂, che può essere importato in Excel per creare tabelle e grafici di decadimento.

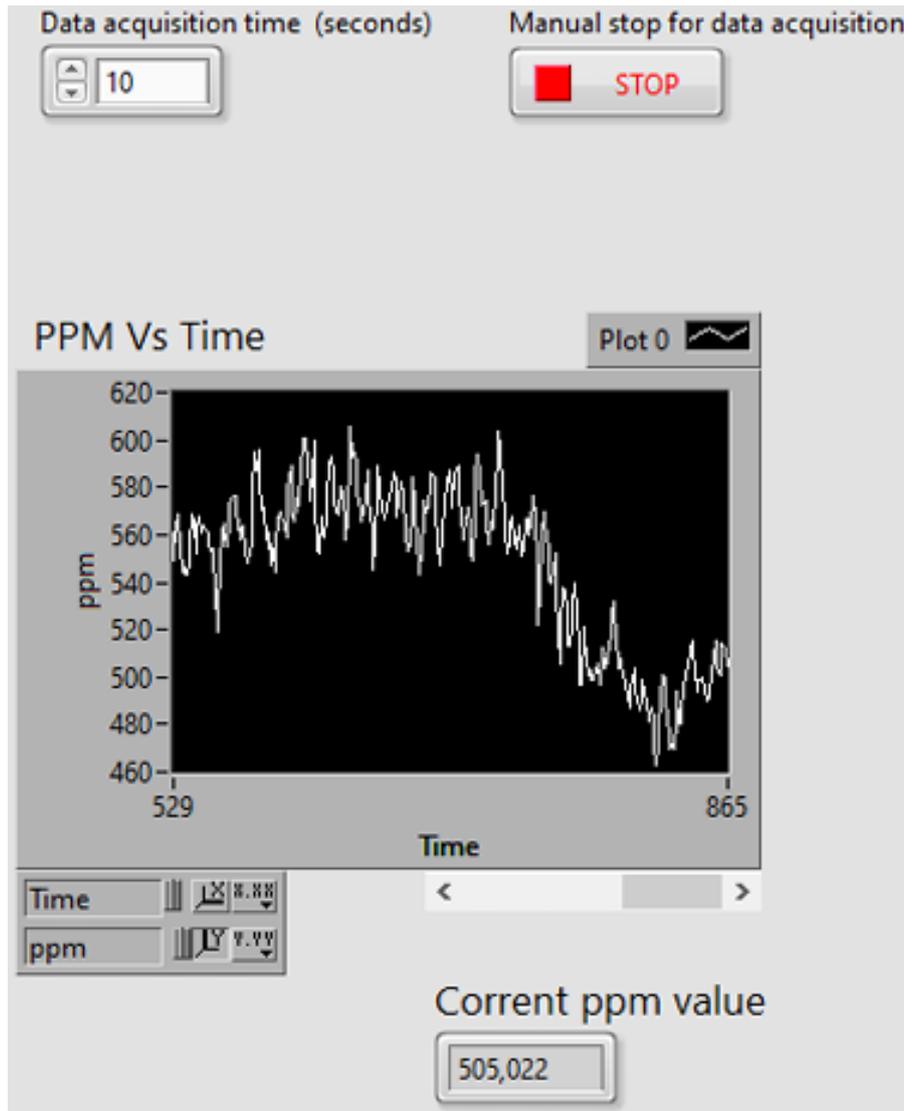


Figura 42: VI LabVIEW per l'acquisizione della CO₂ con il sensore Lastem

2.2.3. Sistema di erogazione CO₂

Al fine di erogare anidride carbonica nella camera per eseguire le prove, è stata predisposta all'esterno una bombola contenente CO₂. La bombola è stata collegata a un sistema riduttore di pressione composto da una manopola per variare la pressione in uscita e da due manometri: quello a destra rileva la pressione all'interno della bombola, mentre quello a sinistra misura la pressione in uscita verso la camera (vedi [figura 43](#)).



Figura 43: bombola con sistema riduttore di pressione ed elettrovalvola Camozzi U7J

Il sistema riduttore di pressione è collegato a sua volta, tramite un tubo flessibile in gomma, ad un'elettrovalvola Camozzi U7J (vedi [figura 43](#) e [figura 44](#)).



Figura 44: elettrovalvola Camozzi U7J

Mantenendo il rubinetto della bombola aperto, è possibile controllare l'erogazione dell'anidride carbonica grazie all'elettrovalvola: un relè (vedi [figura 45](#)) comunica con un computer tramite il software LabVIEW e trasmette l'impulso fornito dall'operatore (vedi [figura 46](#)) all'elettrovalvola ad esso collegata, la quale si regola per consentire o bloccare il passaggio della CO₂.



Figura 45: relè finder 60.12

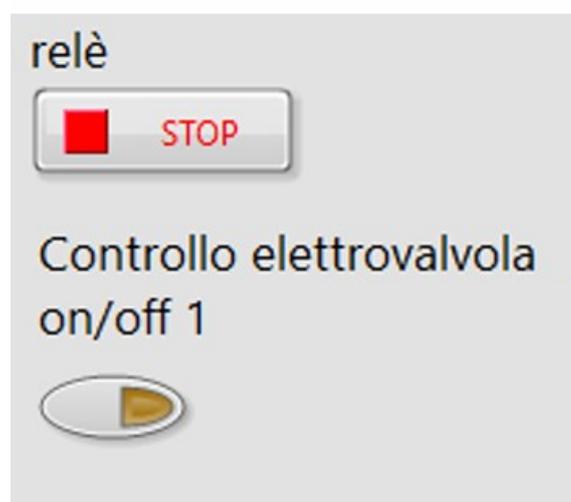


Figura 46: VI LabVIEW per il controllo dell'elettrovalvola

Dall'elettrovalvola riparte un tubo flessibile in gomma che entra nella camera e si va a diramare all'altezza del soffitto in sei ugelli di erogazione (vedi [figura 47](#)). Per bilanciare le perdite di carico gli ugelli sono stati disposti in questo modo: quattro sono negli angoli e gli altri due si trovano in prossimità della metà dei due lati più lunghi (vedi [figura 48](#)).



Figura 47: ugello di erogazione collegato al tubo flessibile in gomma

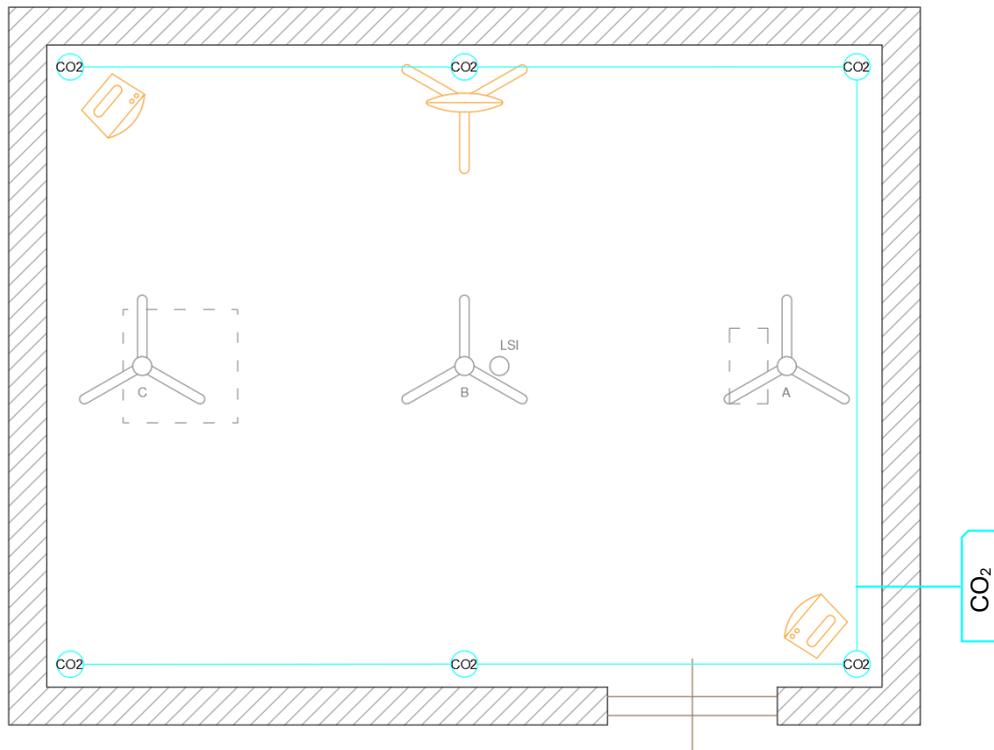


Figura 48: pianta camera climatica con sistema di erogazione CO2 e ventilatori

Per ottenere una distribuzione di CO₂ quanto più possibile omogenea all'interno della camera, oltre al corretto posizionamento degli ugelli di distribuzione, sono stati installati tre ventilatori di cui due posti a terra agli estremi di una diagonale e l'altro ad un metro di altezza in prossimità della metà di uno dei due lati lunghi (vedi [figura 48](#)).

2.3. Setup misura velocità dell'aria

2.3.1. Unità di ventilazione con recuperatore

Per l'esecuzione delle prove di velocità dell'aria nella camera, è stata installata esternamente un'unità di ventilazione meccanica con recuperatore di calore, collegata nella parte posteriore tramite due condotti aeraulici flessibili alle sezioni di mandata e ripresa presenti nel soffitto della camera. Nella parte anteriore è lasciata scollegata in modo da espellere e riprendere l'aria dall'ambiente (vedi [figura 49](#))



Figura 49: unità di ventilazione meccanica con recuperatore "Roccheggiani DRU"

L'involucro è costituito da una struttura sandwich con supporto esterno in Acciaio Zincato (preverniciato RAL 9010 nella versione verticale) e supporto interno in Acciaio Zincato; il coibente è un pannello in gomma [11].

Il recupero di calore avviene tramite degli scambiatori a piastre a flussi incrociati in controcorrente che utilizzano l'aria inquinata proveniente dall'interno dell'abitazione per riscaldare/raffreddare l'aria di rinnovo. I due flussi sono posti a contatto per mezzo di pareti metalliche che permettono di effettuare lo scambio termico mantenendo separati i due flussi tramite apposite sigillature. In questo modo è possibile un recupero termico maggiore del 90% ed evitare che il calore vada disperso con la naturale ventilazione dell'abitazione e allo stesso tempo garantire un costante rinnovo di aria pulita

dall'esterno. Il recuperatore a piastre non ha parti in movimento e pertanto garantisce un'elevata affidabilità e sicurezza di funzionamento, consentendo un basso consumo di energia per gli apparecchi ausiliari. Le piastre sono realizzate in alluminio per le sue caratteristiche di resistenza alla corrosione, facilità di realizzazione, incombustibilità, durata e igiene [11].

Gli elettroventilatori sono di tipo centrifugo, azionati da motori elettronici in corrente continua con velocità modulata da un segnale 0-10V direttamente accoppiati alla girante. Combinano elevate prestazioni con una estrema silenziosità e bassissimi consumi energetici [11].

L'unità di ventilazione permette nella stagione estiva, ove ne sussistano le condizioni, di attuare il "free cooling". Il percorso dell'aria viene modificato automaticamente dal regolatore a bordo macchina mediante una serranda che attiva il percorso di by-pass del recuperatore. I filtri hanno efficienza: G3 ed F7 EN-799. Tutti i filtri sono facilmente estraibili dalle aperture per la periodica sostituzione [11].

Tabella 5: scheda tecnica Roccheggiani DRU [11]

Modello DRU Orizzontale	50 - OR
Portata aria nominale	500
Pressione statica utile	150
Recuperatore di calore	
Efficienza energetica (3)	83.3
Potenza recuperata totale (3)	0.8
Temperatura aria rinnovo (3)	27.0
Umidità aria rinnovo (3)	66.9
Efficienza energetica (2)	88.0
Potenza recuperata totale (2)	3.7
Temperatura aria rinnovo (2)	17.0
Efficienza energetica sensibile (4)	88.0
Ventilatori	
Potenza elettrica nominale ventilatore mandata	230
Corrente elettrica nominale ventilatore mandata	2 x 1.80
Tensione alimentazione	230/1/50
Controllo portata	0..10V
Compliance EN 1254/2014 (5)	
Tipologia dichiarata	
Tipo azionamento	
Tipo recupero calore	
Efficienza termica	83.3
Potenza elettrica assorbita (1)	0.22
Specific fan power	0.46
Pressione sonora a 3m	37.0

Il controllo della portata fornita dall'unità di ventilazione meccanica alla camera climatica è affidato ad un computer con software LabVIEW.

Inizialmente non c'era però alcuna relazione tra il valore di tensione (V) da fornire all'unità di ventilazione per far variare la portata e il numero di ricambi orari (h^{-1}) richiesti nella camera climatica per le prove. Prima di tutto si è cercato quindi di stabilire una correlazione univoca tra questi due parametri.

Rilevazione della portata di mandata in uscita dall'unità di ventilazione

Il primo passo è stato quello di interporre al tubo di mandata in uscita dall'unità di ventilazione un venturimetro (vedi [figura 50](#)).



Figura 50: venturimetro collegato alla mandata

Tramite due tubi flessibili il venturimetro è stato collegato al trasduttore di pressione differenziale "Druck LPX 5481" (vedi [figura 51](#)).



Figura 51: trasduttore di pressione differenziale "Druck LPX 5481"

Tabella 6: scheda tecnica trasduttore Druck LPX 5481 [15]

Characteristic	Details
Accuracy	±0.25% full scale (FS) best fit straight line (BSL)
Operation	Unidirectional or bidirectional
Line Pressure	Vacuum to 300 psig (20 bar)
Outputs	Two-wire 4-20 mA, three-wire 0-5 VDC, 0-10 VDC, four-wire 0-±5 VDC
Compatibility	Gases and liquids compatible with Beryllium Copper, Anodized Aluminum, Brass, and Brazing Solder
Operating Pressure Ranges	
	- inH ₂ O: 0.2, 0.4, 0.8, 2, 4, 8, 20, 40, 80 inH ₂ O (0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 mbar)
	- psi: 7.5, 30, 75, 150 psi (500 mbar, 2, 5, 10 bar)
Overpressure	
	- 20x for ranges 0.4-8 inH ₂ O (10-200 mmH ₂ O)
	- 8x for ranges 20-80 inH ₂ O (500 mm-20 mH ₂ O)
	- 3x for ranges 7.5-150 psi (500 mbar-10 bar)
Static (line) Pressure	Vacuum to 300 psig (20 bar), all ranges
Static Pressure Effect	<2% FS/1000 psi; effects may be zeroed out at operating line pressure
Pressure Media	Fluids/Gases compatible with Anodized Aluminum, Beryllium Copper, Brazing Solder, and Brass
Relative Humidity	0-100%
Transduction Principle	Variable Inductance
Excitation Voltage	
	- 10-30 VDC two-wire, 4-20 mA, 12-±8 mA
	- 18-30 VDC four-wire, 0-10 VDC
	- ±12 VDC four-wire, 0-±5 VDC
Supply Sensitivity	<0.5 to 10-4% FS/Volt
Insulation Resistance	>100 MΩ @ 50 V
Output - Unidirectional	
	- LPM 5000: four-wire, 0-10 VDC
	- LPX 5000: two-wire, 4-20 mA
Output - Bidirectional	
	- LPM 5000: four-wire, 0-±5 VDC
	- LPX 5000: two-wire, 12-±8 mA
Load Impedance	
	- LPX: 0.05 (Vsupply-10) KΩ maximum
	- LPM: 1 KΩ minimum
Resolution	Infinite
Combined Non-Linearity, Hysteresis, and Non-Repeatability	±0.25% FS BSL all ranges
Long Term Stability	<±0.3% FS/year @ stabilized temperature
Zero Offset Adjustment	-15% to 100% of FSPR
Span Setting Adjustment	-20% to 50% of FSPR
Operating Temperature Range	-20°F to 176°F (-28°C to 80°C)
Compensated Temperature Range	
	-4°F to 176°F (-20°C to 80°C)
	22°F to 122°F (-5°C to 50°C)
Temperature Effects	
	- Zero: ±0.012% FS/°F
	- Span: ±0.012% FS/°F
Response Time	10 to 500 msecs, adjustable by switches accessible under the cover
Vibration, KHz	50 g up to 2 KHz
Dead Volume	6 ±0.1 cc's all ranges
Weight	2.1 lb (0.95 kg)

Quest'ultimo comunica via cavo al computer tramite software LabVIEW e trasmette la portata d'aria istantanea (m^3/h) in uscita dalla mandata dell'unità di ventilazione (vedi [figura 52](#)).

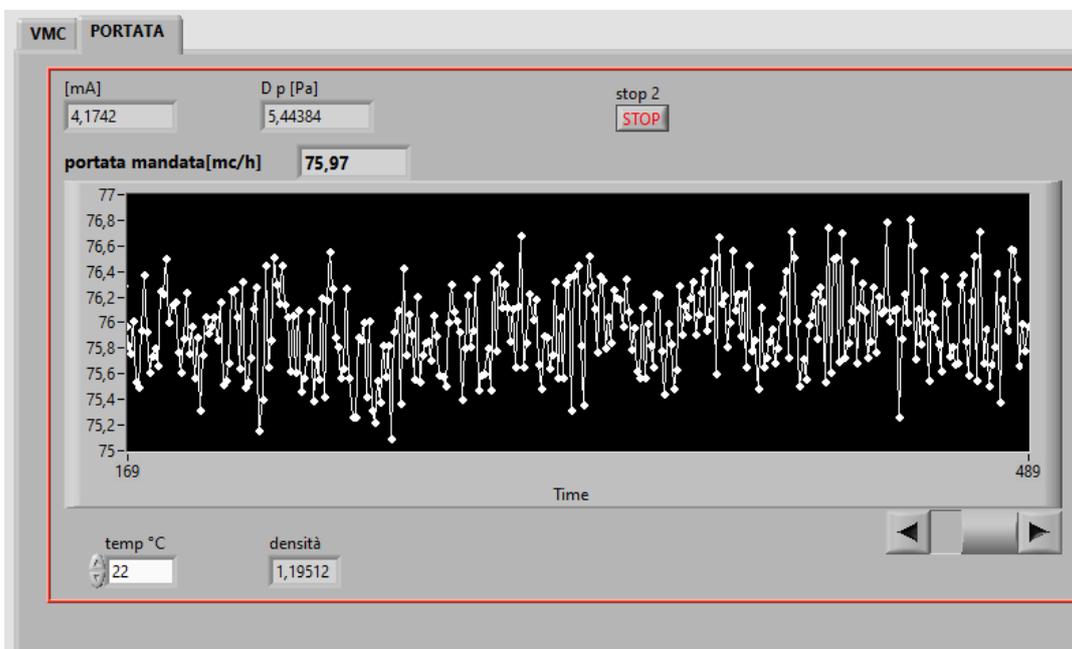


Figura 52: VI LabVIEW della portata di aria istantanea (m^3/h) in uscita dal recuperatore

Rilevazione dell'effettiva portata di mandata in camera tramite il diffusore

La portata d'aria che arriva in camera è inferiore a quella misurata in uscita dall'unità di ventilazione, a causa di perdite nelle tubazioni. È stato quindi necessario rilevare anche la portata effettiva in ingresso dal diffusore di mandata, servendosi del balometro "Testo 420".

Lo strumento è stato prima centrato sotto il diffusore (vedi [figura 53](#)) e poi messo a contatto con il soffitto. È stata avviata l'unità di ventilazione e sono state fatte prove a vari step di potenza. I dati sono stati raccolti da un computer che comunica in tempo reale, via bluetooth, con un palmare installato alla base del balometro.



Figura 53: balometro "Testo 420" nella fase di posizionamento

Tabella 7: scheda tecnica balometro "Testo 420"

Portata volumetrica	
Campo di misura	50 a 4000 m ³ /h
Precisione	±3 % del v.m. + 12 m ³ /h at +22 °C 1013 hPa (85 a 3500 m ³ /h)
Tempo risposta	1 s (t ₉₀)
Risoluzione	1 m ³ /h
Dati tecnici generali	
Peso	2900 g
Dimensioni	610 x 610 mm (Standard hood)
Temperatura di lavoro	-5 a +50 °C
Requisiti di sistema	richiede iOS 12.0 o superiore; richiede Android 6.0 o successivo; necessario dispositivo mobile con Bluetooth 4.0
Direttive UE/CE	Direttiva UE 2014/30/UE

Calcolo della potenza da fornire al recuperatore in funzione di n (ricambi orari)

I dati ottenuti dalle rilevazioni sono stati inseriti in un foglio di calcolo ed è stato creato un grafico dove sull'asse delle ordinate sono riportate le portate d'aria rilevate dal balometro e dal venturimetro (m³/h) e sulle ascisse la potenza percentuale da fornire all'unità di ventilazione. Collegando i punti nel grafico si ottengono due rette: una per la portata in mandata dall'unità di ventilazione e una per quella in ingresso alla camera tramite il diffusore. Come è già stato detto la seconda risulta inferiore a causa delle perdite di carico nei condotti.

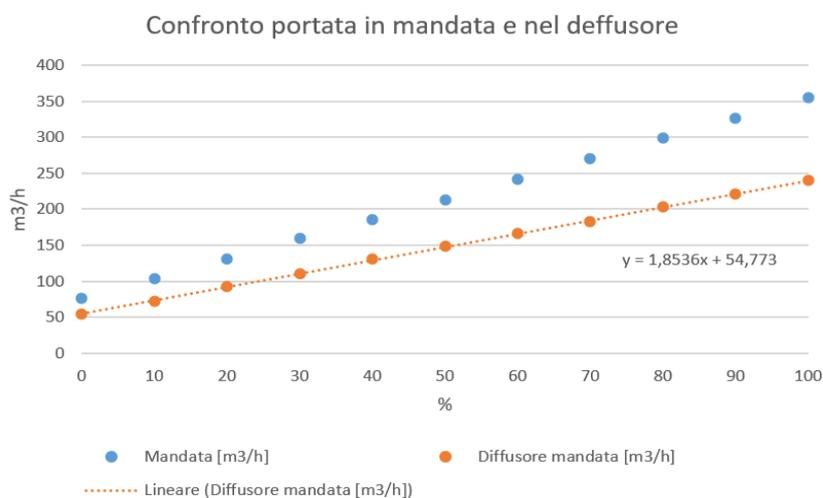


Figura 54: grafico riportante la portata in funzione della potenza fornita all'unità di ventilazione

La retta ottenuta collegando i punti “diffusore mandata” è stata linearizzata ed è stata ricavata la sua equazione. In questo modo è possibile, per una data portata richiesta, stabilire la potenza da fornire all'unità di ventilazione.

Noto il volume della camera $V = 40,36 \text{ m}^3$, è stata calcolata la portata da garantire in funzione dei ricambi orari richiesti ($= V \times N$), quindi la percentuale di potenza da impostare al recuperatore tramite LabVIEW (vedi [tabella 8](#)).

Tabella 8: portata in funzione dei ricambi orari

N richiesti		Portata richiesta	Percentuale da impostare
1,5	h-1	60,540 m ³ h-1	3,11
3	h-1	121,080 m ³ h-1	35,77
5	h-1	201,800 m ³ h-1	79,32

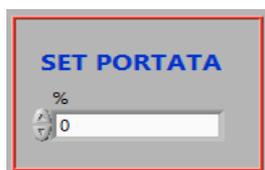


Figura 55: VI LabVIEW per il set della portata

2.3.2. Sistema a due assi

È stato utilizzato per le prove di velocità dell'aria. Il sistema è composto da due aste in alluminio, una orizzontale e una verticale, ciascuna con una guida scorrevole comandata da un motore passo-passo.



Figura 56: sistema a due assi

Il motore installato sulla guida dell'asta orizzontale permette la traslazione dell'asta verticale ad essa collegata, mentre quello installato sull'asta verticale fa traslare un supporto per i sensori.



Figura 57: guida dell'asta orizzontale e motore passo-passo dell'asta verticale

Nella [tabella 9](#) vengono riportati gli ingombri complessivi del sistema “totale” e il range d’azione delle due guide “utile”.

Tabella 9: ingombri e range d'azione del sistema a 2 assi

	Orizzontale [mm]	Verticale [mm]
Totale	2550	2430
«Utile»	1995	1998

Nel sistema sono installati due motori passo-passo ad anello chiuso “Nema 24 serie S 4.0 Nm” (vedi [figura 58](#)) con Encoder rotativo incrementale “1000PPR, 5,25V, 6000min⁻¹” [12].



Figura 58: motore passo-passo Nema 24 serie S

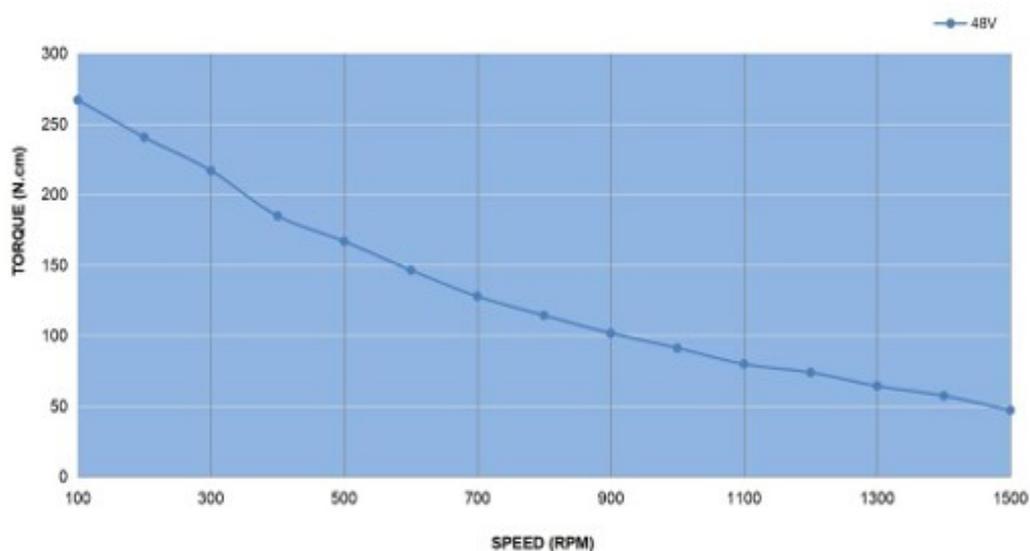


Figura 59: curva di coppia motore Nema 24 serie S [12]

Anemometri

Nel supporto installato sull'asta verticale sono stati posizionati tre anemometri a filo caldo per la rilevazione della velocità nelle direzioni x, y e z (vedi [figura 60](#) e [figura 61](#)).

Gli anemometri a filo caldo utilizzano un filo molto sottile (nell'ordine di pochi micron) riscaldato elettricamente alcuni gradi sopra la temperatura ambientale. Il flusso di aria asporta calore e quindi raffredda il filo. Siccome la resistenza elettrica di quasi tutti i metalli (per gli anemometri a filo caldo è molto utilizzato il tungsteno) dipende dalla temperatura, è quindi possibile ottenere una relazione tra la resistenza calcolata sul filo e la velocità del flusso di aria [13].



Figura 60: anemometri per la misura di V_x e V_z posizionati sul supporto

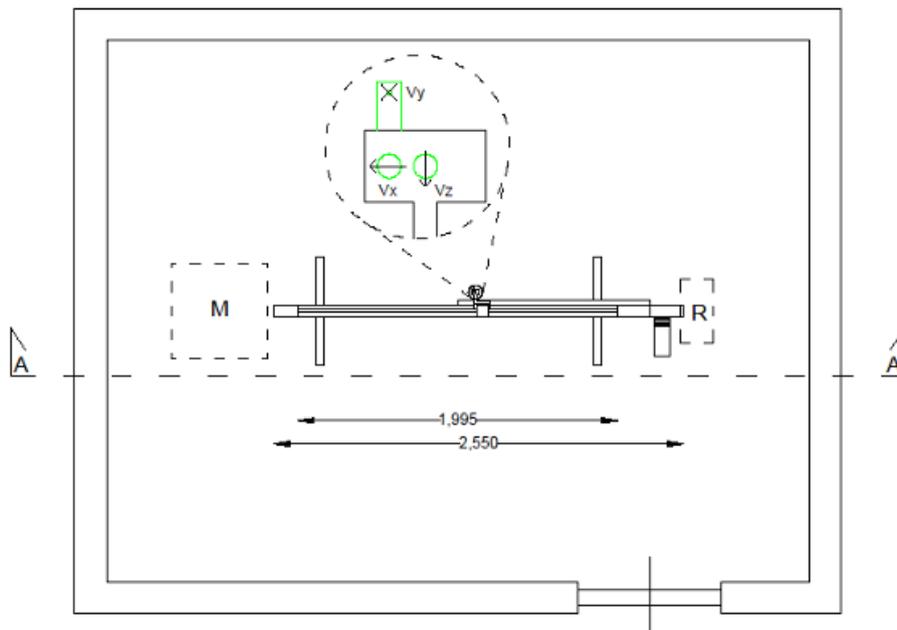


Figura 61: vista di anemometri e sistema a due assi in pianta

Trasmettitori

Gli anemometri posizionati sull'asta comunicano via cavo con i trasmettitori "serie HD2903" per l'elaborazione del segnale. I trasmettitori sono poi collegati ad un computer per l'acquisizione dei dati tramite LabVIEW.



Figura 62: trasmettitore serie HD2903

La famiglia di trasmettitori della serie HD29XX è impiegata nel controllo della velocità dell'aria nel campo del condizionamento e della ventilazione (HVAC/BEMS), nei settori industriali e civili, in luoghi affollati (mense, auditori, palestre). Il sensore per la velocità dell'aria è a film sottile, la guaina delle sonde è in AISI304, il filtro per l'umidità relativa in rete metallica da 20 μ , materiali che permettono l'uso anche in ambienti ostili [14].

Tabella 10: scheda tecnica trasmettitore serie HD2903

Caratteristiche tecniche		Note
Range di misura velocità dell'aria	Range 1 = 0,05...1 m/s Range 2 = 0,1...2 m/s Range 3 = 0,20...10 m/s Range 4 = 0,20...20 m/s	Range di misura selezionabile a mezzo dip-switch.
Accuratezza		@ 50% UR e 1013 hPa
Range 1	$\pm(0,1 \text{ m/s} + 3\% \text{ della misura})$	
Range 2	$\pm(0,15 \text{ m/s} + 3\% \text{ della misura})$	
Range 3	$\pm(0,5 \text{ m/s} + 3\% \text{ della misura})$	
Range 4	$\pm(0,7 \text{ m/s} + 3\% \text{ della misura})$	

Range uscita	0...1 m/s	0...2 m/s	0...10 m/s	0...20 m/s
Posizione del dip-switch				

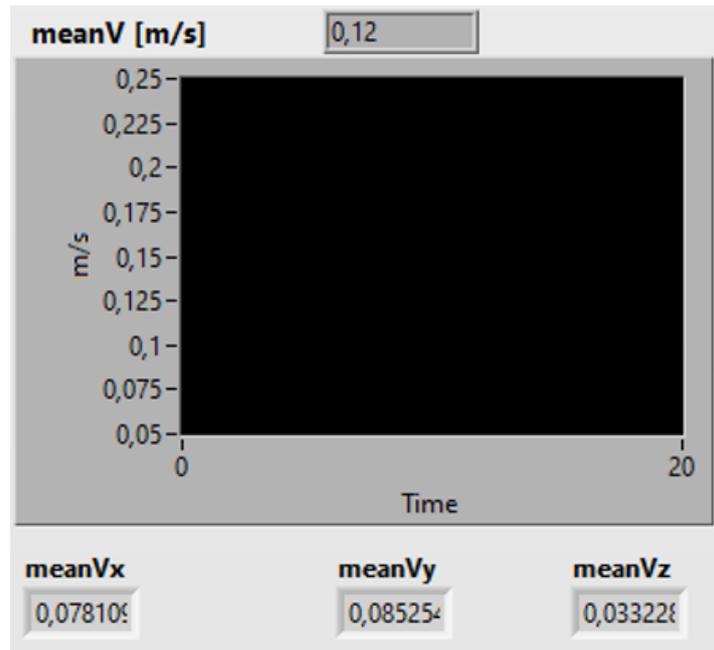


Figura 63: VI LabVIEW per la lettura e l'acquisizione delle velocità

3. Prove di CO₂

3.1. Prove antecedenti a interventi migliorativi della camera

Comprendono tutte le prove svolte prima degli interventi migliorativi che ha subito la camera, trattati al punto 2.1.

3.1.1. Prima prova del 27/02/24

Ricambio aria con ventilazione esterna	Ventilazione interna	Tempo di erogazione	CO ₂ erogata
Si, prima dell'erogazione	No	300 s	0,216 kg

Per iniziare la prova con l'aria in condizioni ottimali, prima dell'erogazione della CO₂ è stata aperta la porta e azionata l'unità di ventilazione, che ha immesso aria pulita prelevata all'esterno. Una volta raggiunta una concentrazione di anidride carbonica inferiore a 500 ppm nella camera la ventilazione è stata spenta e la porta è stata chiusa.

È stata quindi azionata l'elettrovalvola ed erogata CO₂ nella camera. Prima dell'erogazione la bombola pesava 10,856 kg e successivamente 10,640 kg: in 5 minuti sono stati erogati 0,216 kg di anidride carbonica.

Risultati

Come si nota dai grafici [1A](#), [1B](#) e [1C](#), durante la prima fase di erogazione, alcuni sensori come il 7 e il 5 sono arrivati a saturazione. Questo è accaduto perché la CO₂, più pesante dell'aria, una volta erogata dagli ugelli posti in alto, si è depositata nella parte bassa e lì è rimasta, non avendo modo di miscelarsi con l'aria a causa della ventilazione interna spenta.

In quei punti il valore di anidride carbonica ha superato le 5000 ppm e i sensori, per loro specifiche, non sono stati in grado rilevare oltre questo valore.

Il decadimento ha avuto le seguenti caratteristiche:

- Disomogeneo nella prima parte a causa della stratificazione, che è rimasta molto marcata per circa 340 minuti dopo l'erogazione.
- Rapido perché, essendo la camera poco isolata, l'esfiltrazione di CO₂ è stata marcata. In poco più di un'ora alcuni sensori registrano un calo di 2000 ppm.

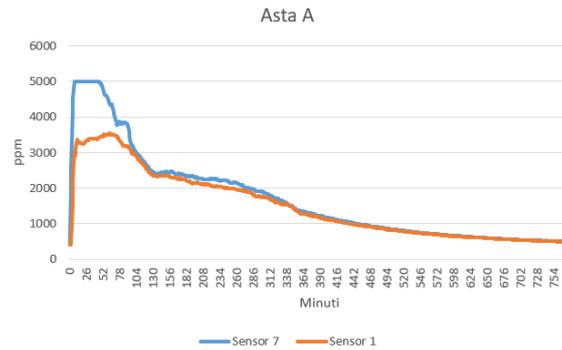


Grafico 1A: Andamento CO₂ asta A

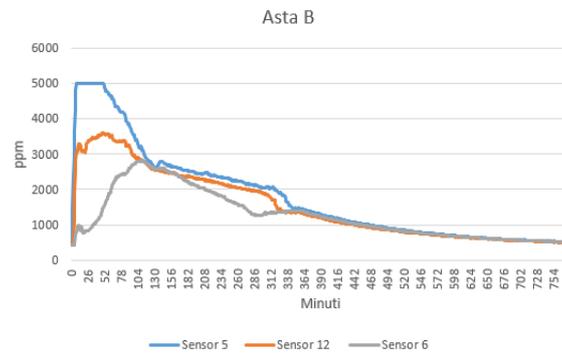


Grafico 1B: Andamento CO₂ asta B

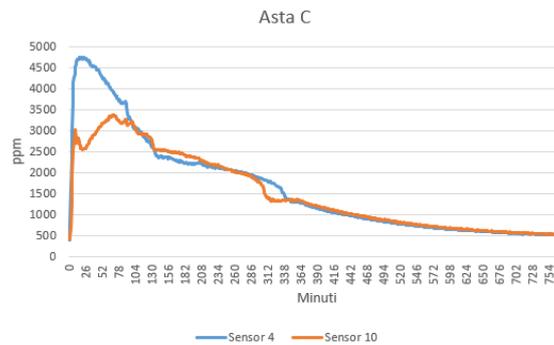


Grafico 1C: Andamento CO₂ asta C

3.1.2. Seconda prova del 28/02/2024

Ricambio aria con ventilazione esterna	Ventilazione interna	Tempo di erogazione	CO ₂ erogata
Si, prima dell'erogazione	Si, durante l'erogazione	300 s	0,240 kg

Questa prova differisce dalla prima solo per l'azionamento dei ventilatori interni durante la fase di erogazione della CO₂, nel tentativo di evitare la stratificazione creatasi nella prova precedente.

Prima dell'erogazione la bombola pesava 10,636 kg e successivamente 10,396 kg: in 5 minuti sono stati erogati 0,240 kg di anidride carbonica.

Risultati

Come si può vedere dai grafici [2A](#), [2B](#) e [2C](#), nessuno dei sette sensori è andato in saturazione; tutti hanno rilevato un valore massimo di CO₂ ben inferiore a 5000 ppm e simile tra loro nella prima fase (le linee sono quasi sovrapposte). Da questo si deduce che i ventilatori interni hanno impedito che l'anidride carbonica immessa si stratificasse tutta sul pavimento.

Una volta terminata però la fase di erogazione e spenti i ventilatori, la situazione si è ripetuta: la CO₂, più pesante dell'aria, è scesa verso il basso andandosi a stratificare sul pavimento. Il decadimento è poi proseguito come nella prova precedente.

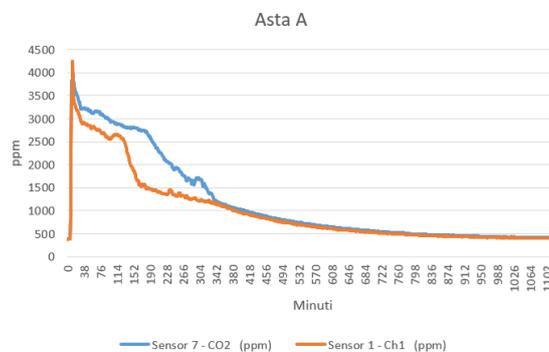


Grafico 2A: Andamento CO₂ asta A

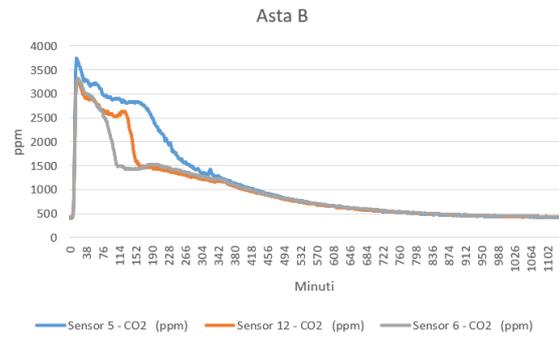


Grafico 2B: Andamento CO2 asta B

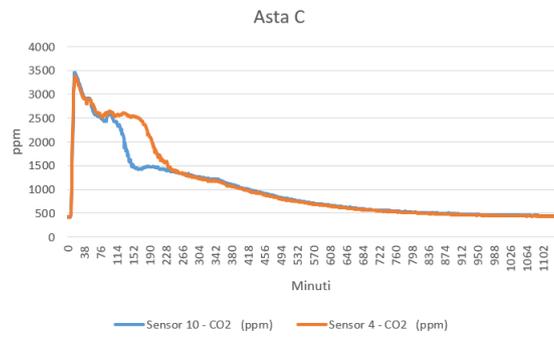


Grafico 2C: Andamento CO2 asta C

3.1.3. Terza prova del 29/02/2024

Ricambio aria con ventilazione esterna	Ventilazione interna	Tempo di erogazione	CO ₂ erogata
Si, prima dell'erogazione	Si, sempre	330 s	0,244 kg

A differenza delle due prove precedenti, i ventilatori interni sono rimasti sempre accesi, fino al completo decadimento della CO₂.

Prima dell'erogazione la bombola pesava 10,396 kg e successivamente 10,152 kg: in 5 minuti e 30 secondi sono stati erogati 0,244 kg di anidride carbonica.

Risultati

Come mostrano i grafici [3A](#), [3B](#) e [3C](#), i ventilatori interni, sempre accesi, hanno fatto sì che la CO₂ immessa si distribuisse in maniera uniforme su tutto il volume e rimanesse tale fino al completo decadimento, senza stratificazioni.

L'unica problematica rimasta a questo punto è il decadimento rapido, dovuto al poco isolamento della camera e alla conseguente esfiltrazione di CO₂. Infatti, i valori rilevati dai sensori scendono sotto i 1000 ppm già dopo 3 ore dall'erogazione.

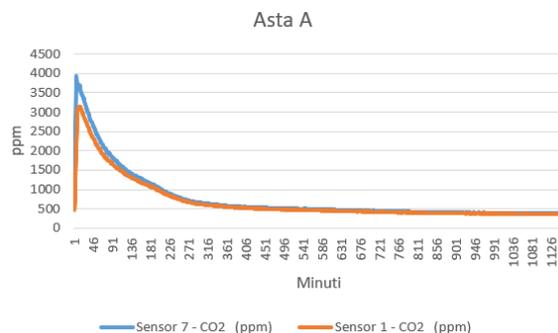


Grafico 3A: Andamento CO₂ asta A

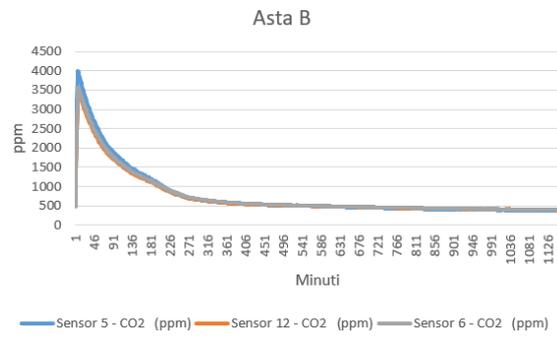


Grafico 3B: Andamento CO2 asta B

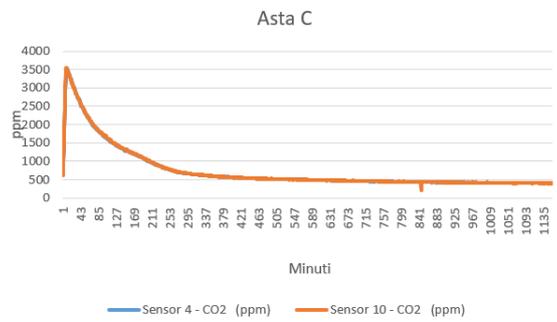


Grafico 3C: Andamento CO2 asta C

3.2. Prove successive agli interventi migliorativi

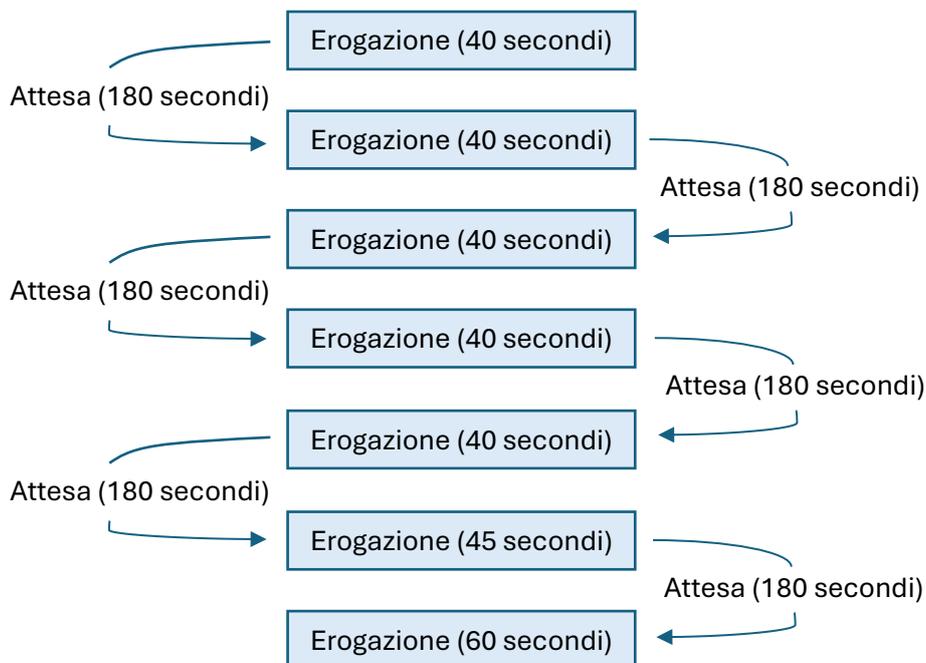
Comprendono tutte le prove svolte successivamente agli interventi migliorativi che ha subito la camera, trattati al punto 2.1.

3.2.1. Quarta prova del 21/03/2024

Ricambio aria con ventilazione esterna	Ventilazione interna	Erogazione	CO ₂ erogata
Si, prima dell'erogazione	Si, sempre	A intervalli	0,228 kg

Come per le prove precedenti è stata utilizzata l'unità di ventilazione esterna per il ricambio d'aria prima dell'avvio della prova e i ventilatori interni sono rimasti accesi fino al completo decadimento della CO₂.

Per fare in modo che l'anidride carbonica erogata si mescolasse omogeneamente con l'aria interna si è deciso di suddividere l'erogazione in più step, intervallati da tempi d'attesa. Qui sotto viene riportato lo schema seguito per l'erogazione.



Schema 1: erogazione CO₂ quarta prova

Come si vede nel [grafico 4.0](#) il sensore 6, che è posizionato più in alto rispetto agli altri, è quello che ha risentito maggiormente delle fasi di erogazione, proprio per la sua vicinanza agli ugelli posti nel soffitto.

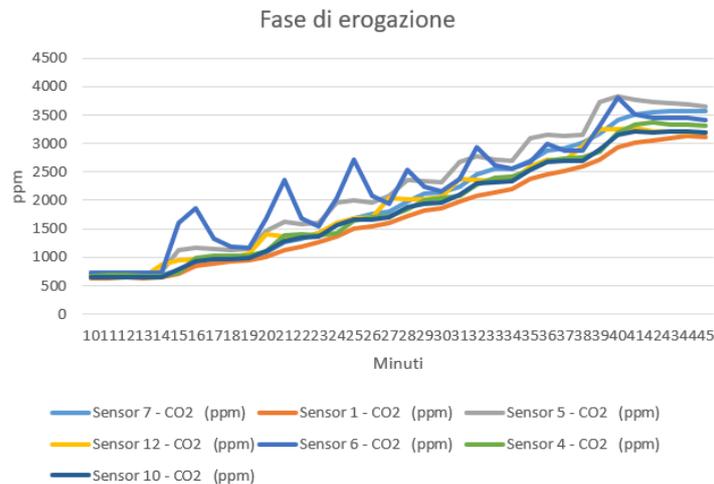


Grafico 4.0: Fase di erogazione CO2 quarta prova

Risultati

L'erogazione a step fa sì che, immediatamente dopo l'ultima fase, i valori rilevati dai sette sensori siano quasi sovrapponibili: tutti raggiungono il valore massimo in un intervallo molto ristretto, di circa sette minuti.

Anche nella fase di decadimento i valori sono sovrapponibili, per tutta la durata della prova (vedi [grafico 4.1](#)).

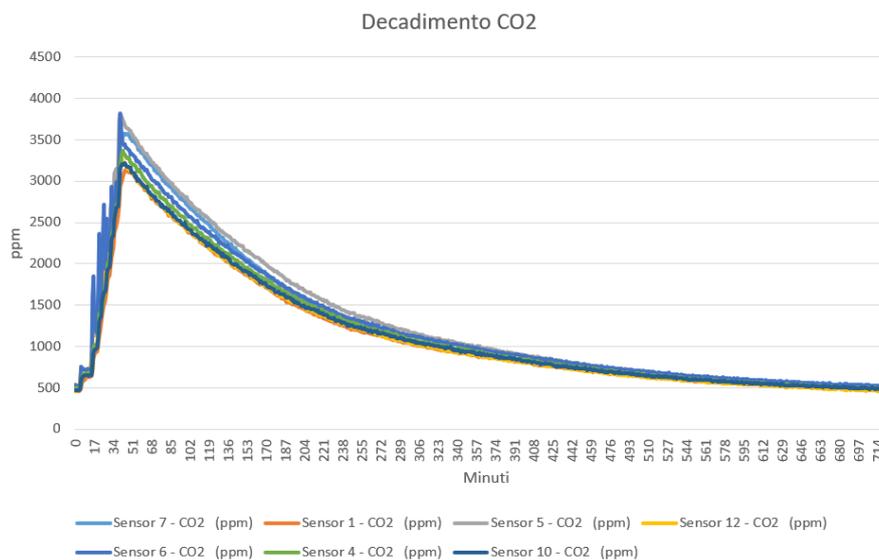


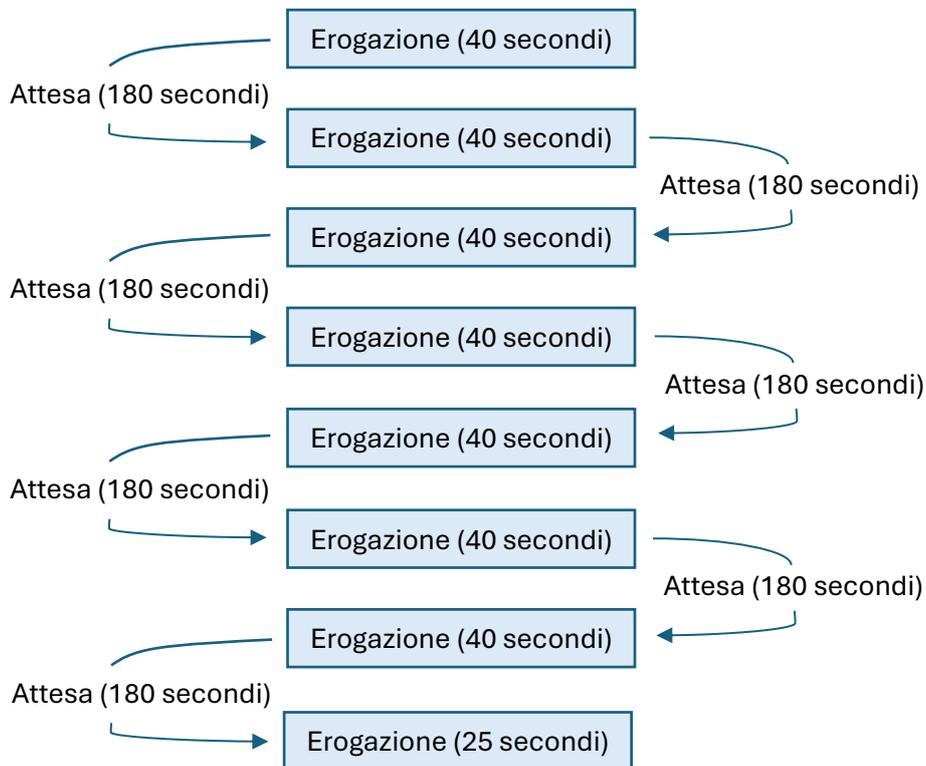
Grafico 4.1: Decadimento CO2 quarta prova

3.2.2. Quinta prova del 25/03/2024

Ricambio aria con ventilazione esterna	Ventilazione interna	Erogazione	CO ₂ erogata
Si, prima dell'erogazione	Si, sempre	A intervalli	0,228 kg

La procedura seguita per l'esecuzione della prova rispecchia quella precedente, anche i grammi persi nella bombola sono gli stessi.

L'unica differenza è che sono state fatte otto erogazioni al posto di sette (vedi [schema 2](#)).



Schema 2: erogazione CO₂ quinta prova

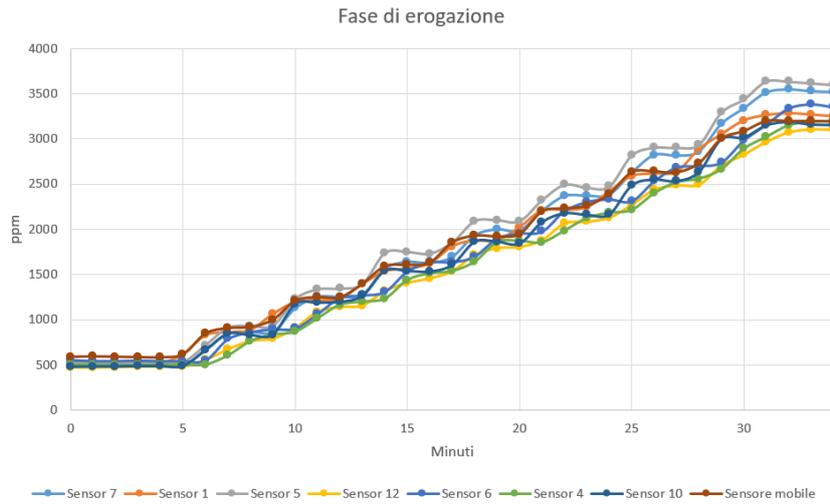


Grafico 5.0: Fase di erogazione CO2 quinta prova

Risultati

Anche i risultati, come si vede dal [grafico 5.0](#) e dal [grafico 5.1](#), rispecchiano quelli visti nella prova precedente: i valori rilevati dai vari sensori, durante il decadimento, sono sovrapponibili.

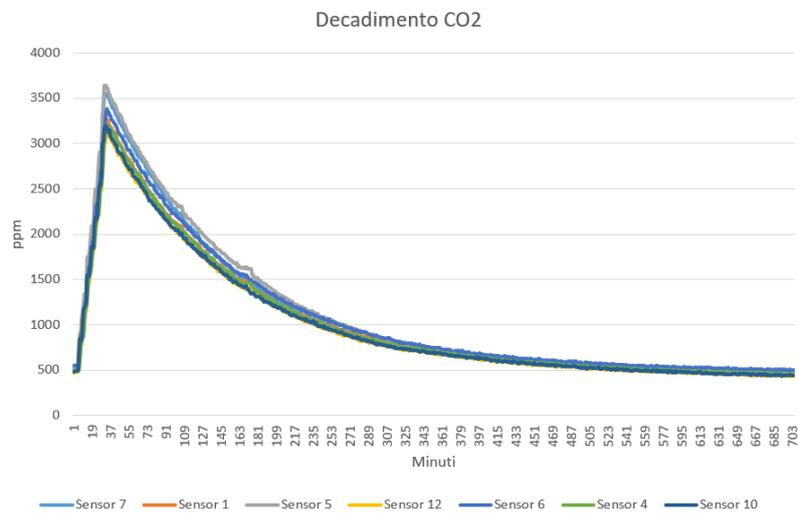


Grafico 5.1: Decadimento CO2

3.3. Confronto delle prove pre e post interventi

Come già discusso al punto 2.1 la camera climatica ha subito interventi migliorativi, volti ad incrementare l'isolamento e ridurre l'esfiltrazione dell'aria interna.

Per valutare l'efficacia degli interventi svolti sono state prese in considerazione due prove di CO₂: quella del 29/02 con la camera in condizioni di partenza e quella del 21/03 con le migliori applicate.

Viene messa a confronto, per entrambe le prove, la curva di decadimento del valore medio di CO₂, ottenuta calcolando la media delle letture dei sette sensori, istante per istante.

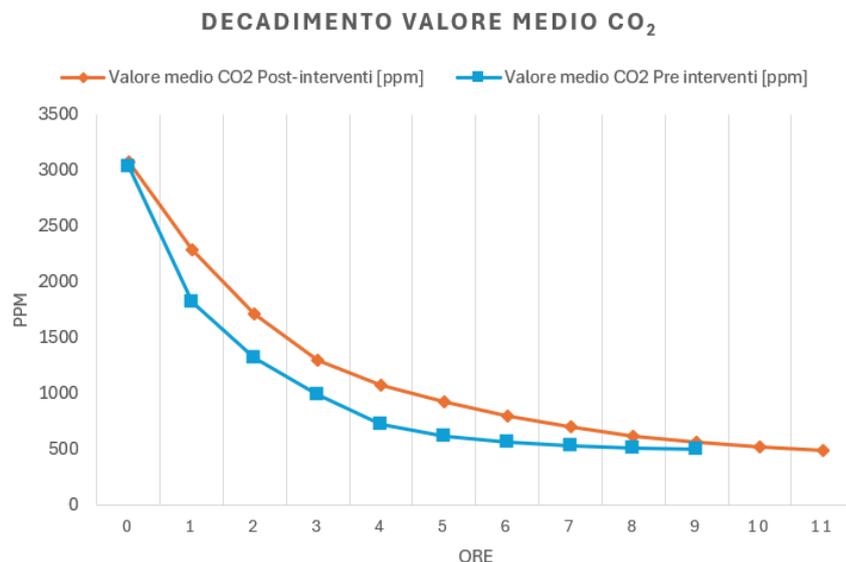


Grafico 6: confronto decadimento medio CO₂ pre e post interventi

Il [grafico 6](#) mette in evidenza le differenze tra le due curve. In particolare, prendendo come riferimento una concentrazione di CO₂ di 500 ppm, si osserva che questo valore viene raggiunto nel primo caso già dopo sei ore, mentre nel secondo caso bisogna attendere almeno dieci ore. Il tempo necessario al completo decadimento è aumentato del 65%, ciò conferma che la dispersione è meno marcata e avviene in modo più graduale.

Le migliorie applicate si sono rivelate utili per sviluppi futuri. Infatti, quando verrà installata la parete verde in camera, sarà più facile analizzare la quantità di CO₂ assorbita dalle piante, grazie a una dispersione quasi trascurabile verso l'esterno.

4. Misura della velocità dell'aria

Per soddisfare le esigenze di qualità dell'aria negli ambienti chiusi, è necessario garantire un certo numero di ricambi orari (vedi capitolo 1.3), che può variare in funzione della destinazione d'uso del locale.

In questa trattazione, il locale oggetto di valutazione è la camera climatica. Al variare dei ricambi orari varierà la richiesta di aria di rinnovo, quindi la velocità dell'aria immessa nella camera tramite il diffusore ed espulsa dalla bocchetta. Risulta quindi necessario creare una mappa di velocità dell'aria per verificare se le esigenze di comfort termico, legate alla velocità, sono soddisfatte.

A causa delle limitazioni di tempo, non è stato possibile effettuare tutte le prove previste. Pertanto, l'analisi si è concentrata esclusivamente sulle prove relative a due specifici tassi di ricambio orari, nella zona della ripresa.

Il sistema a due assi è stato posizionato a contatto con la parete, in modo da rilevare interamente il flusso in ripresa dalla bocchetta (vedi [figura 64](#)).

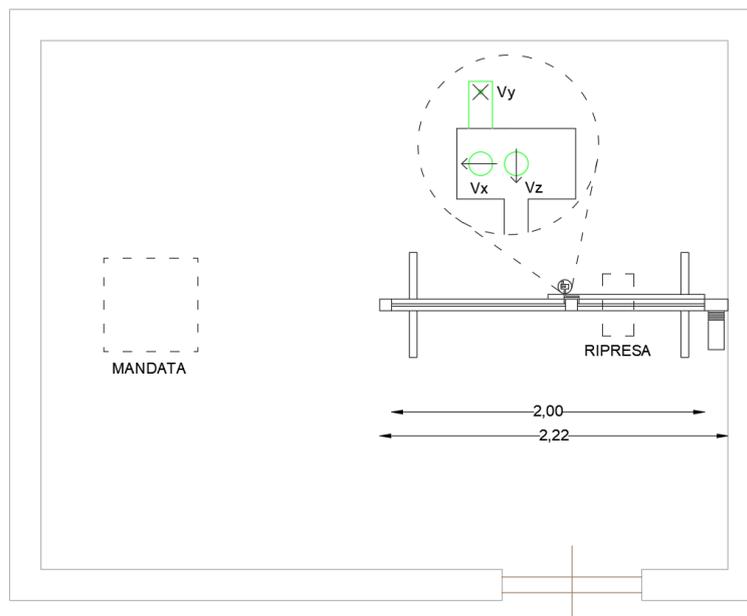


Figura 64: sistema a due assi per la rilevazione della velocità dell'aria in ripresa

Attraverso l'uso di un foglio di calcolo, sono stati assegnati valori alle variabili x e y, identificati come i punti in cui il sistema deve effettuare la misurazione della velocità (vedi [tabella 11](#)). Queste variabili corrispondono anche agli unici spostamenti consentiti al sistema: x in direzione orizzontale e y in direzione verticale.

X[mm]	Y[mm]
0	0
500	0
1000	0
1500	0
1995	0
1995	495
1500	495
1000	495
500	495
0	495
0	990
500	990
1000	990
1500	990
1995	990
1995	1485
1500	1485
1000	1485
500	1485
0	1485
0	1980
500	1980
1000	1980
1500	1980
1995	1980

Tabella 11: foglio di calcolo

Il file contenente il foglio di calcolo viene aperto dal programma LabVIEW (vedi [figura 65](#)), il quale invia i comandi al sistema a due assi per consentirne il movimento e l'esecuzione delle misurazioni. Il sistema si sposta nei punti designati seguendo l'ordine nella tabella, fermandosi in ciascuna posizione per alcuni secondi al fine di calcolare la media dei valori istantanei che rileva.

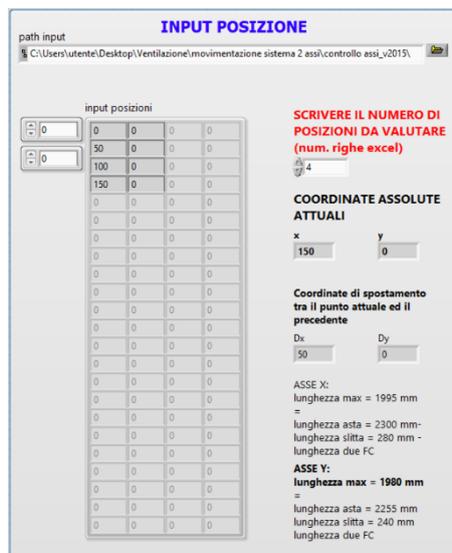
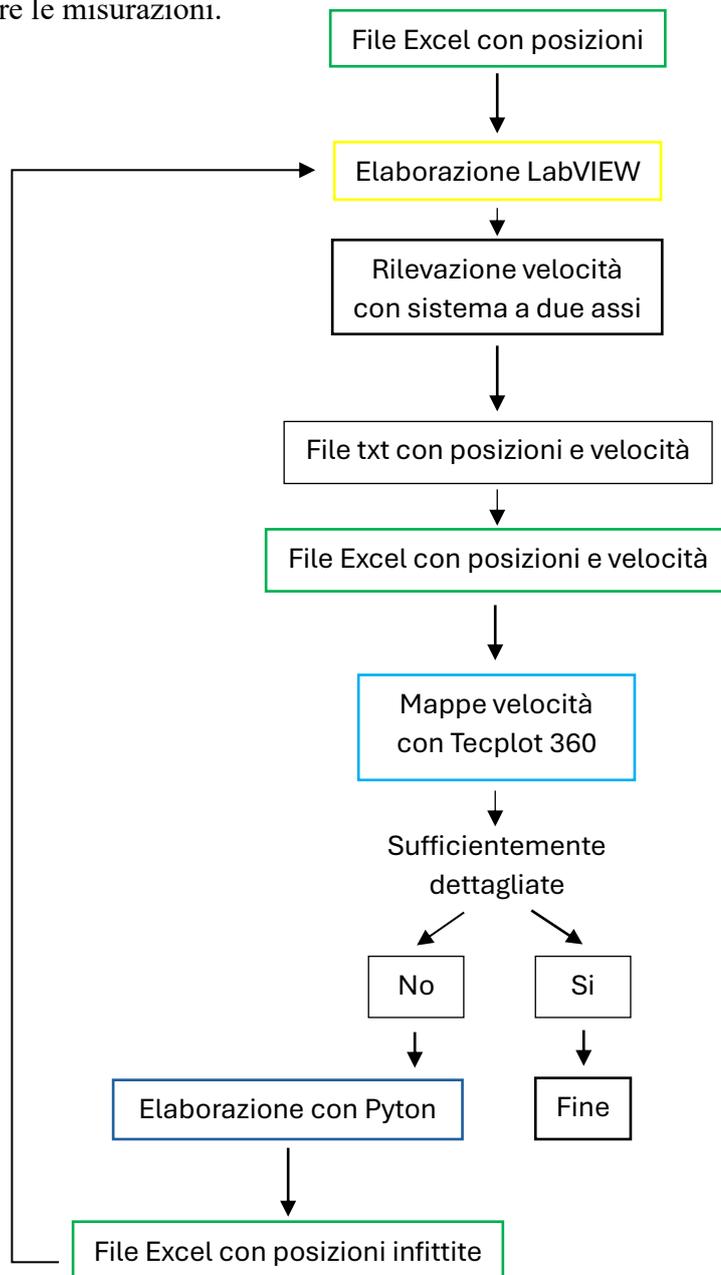


Figura 65: VI LabVIEW per l'input delle posizioni al sistema a due assi

Al termine delle misurazioni, viene creato un file di testo contenente le posizioni e le relative velocità. Questo file viene successivamente importato in Excel, necessario per la creazione delle mappe di velocità con Tecplot 360.

Qualora le mappe di velocità non risultino sufficientemente dettagliate, è possibile effettuare un'elaborazione con Python: il programma analizza il file Excel contenente le posizioni e le velocità, generando un nuovo file con un maggior numero di posizioni, infittite ove necessario. Questo file dovrà essere nuovamente letto da LabVIEW per ripetere le misurazioni.



Schema 3: procedimento per la creazione delle mappe di velocità

4.1. Prova del 23/05 con $n = 1,5$

Per garantire un tasso di ricambio orario di 1,5 l'unità di ventilazione è stata impostata al 3,11% della sua potenza. Sono stati stabiliti i punti di misurazione e inseriti in un foglio di calcolo (vedi [tabella 11](#)). È stata poi seguita tutta la procedura descritta nello [schema 3](#), ripetendo tre volte il processo di infittimento.

Di seguito sono riportate le quattro mappe di velocità realizzate con Tecplot 360: la mappa iniziale e i tre successivi infittimenti.

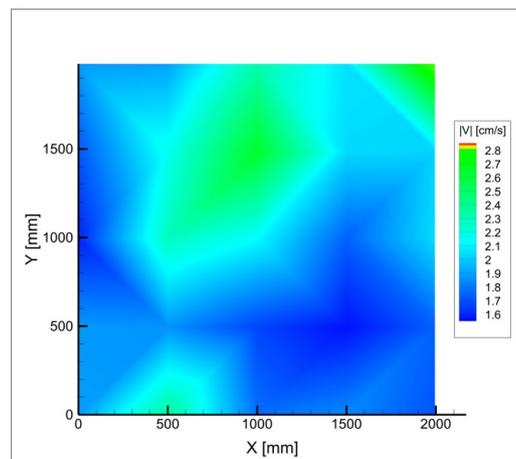


Figura 66: mappa velocità prima rilevazione

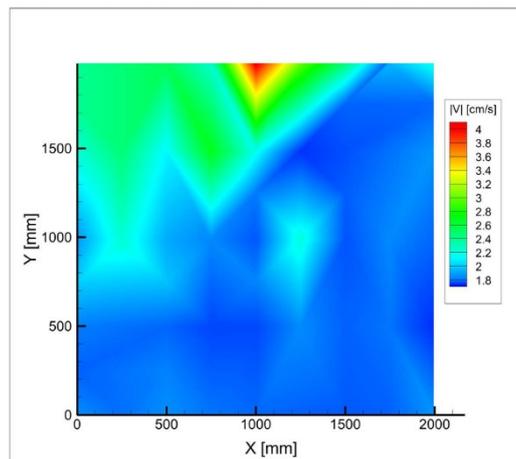


Figura 67: mappa velocità seconda rilevazione

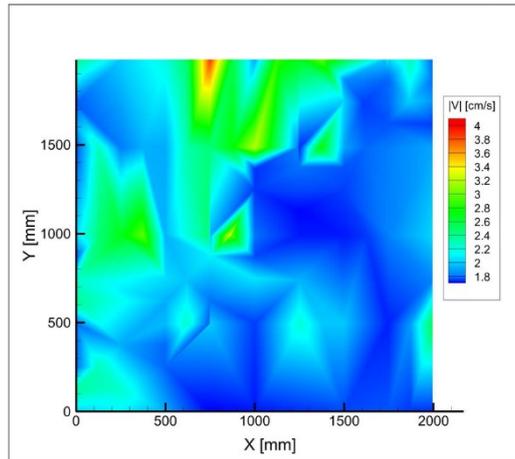


Figura 68: mappa velocità terza rilevazione

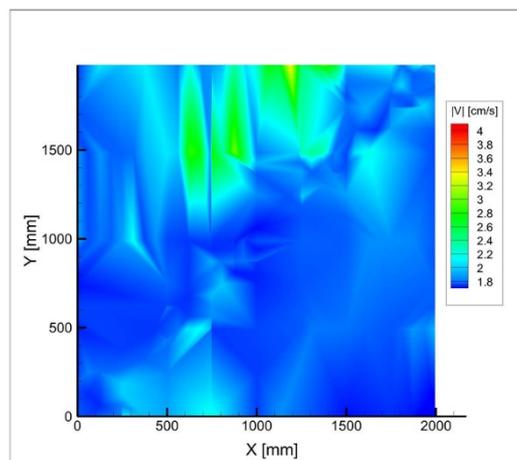


Figura 69: mappa velocità quarta rilevazione

Risultati

Come è evidente dalle mappe di velocità sopra riportate, con l'aumentare dell'infittimento risulta più semplice osservare le variazioni di velocità e i valori assunti in specifici punti dell'ambiente.

Se si considerando i valori assunti dalla velocità, sono tutti compresi in un intervallo che va da 1,5 a 3 cm/s. Tali valori, essendo molto bassi, non risultano fastidiosi per gli occupanti, in quanto le velocità più elevate si registrano in prossimità della bocchetta posta sul soffitto.

4.2. Prova del 24/05 con $n = 5$

Per garantire un tasso di ricambio orario di 5 l'unità di ventilazione è stata impostata al 35,77% della sua potenza. Tutta la procedura ricalca quella descritta nella prova precedente; anche in questo caso è stato ripetuto per tre volte il processo di infittimento.

Di seguito sono riportate le quattro mappe di velocità realizzate con Tecplot 360: la mappa iniziale e i tre successivi infittimenti.

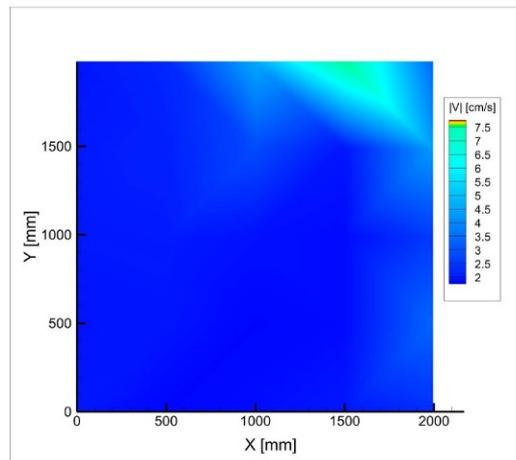


Figura 70: mappa velocità prima rilevazione

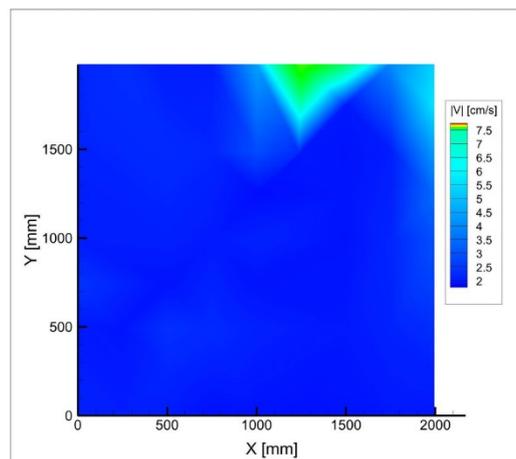


Figura 71: mappa velocità seconda rilevazione

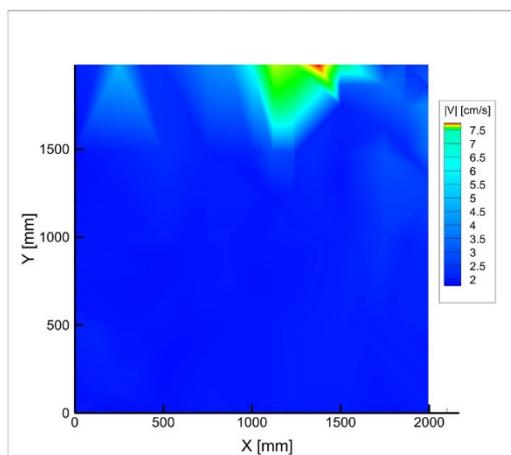


Figura 72: mappa velocità terza rilevazione

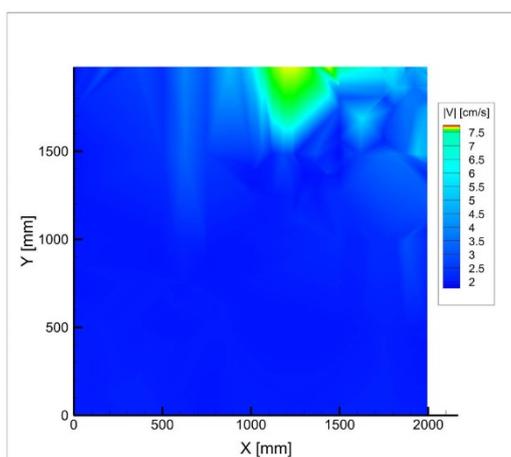


Figura 73: mappa velocità quarta rilevazione

Risultati

Come già osservato nella prova precedente, con l'aumentare dell'infittimento risulta più semplice osservare le variazioni di velocità e i valori che essa assume in specifici punti dell'ambiente.

I valori rilevati sono compresi in un intervallo che va da 2 a 7,5 cm/s. Tali valori, essendo più elevati rispetto a quelli della prova precedente, potrebbero arrecare fastidio agli occupanti. Tuttavia, è importante considerare che questi valori sono localizzati in una specifica zona e a livello del soffitto.

5. Conclusioni

L'analisi condotta ha permesso di comprendere in modo approfondito le dinamiche di erogazione e decadimento della CO₂ all'interno della camera climatica, evidenziando l'importanza dell'isolamento e della ventilazione nel controllare tali processi.

Le migliorie apportate all'isolamento della camera hanno avuto un impatto significativo, riducendo la dispersione della CO₂ e prolungando il tempo di permanenza della concentrazione desiderata. Questo risultato è particolarmente rilevante per futuri esperimenti, come l'installazione della parete verde, che richiederanno un controllo preciso delle condizioni ambientali per valutare l'assorbimento di anidride carbonica da parte delle piante.

L'attivazione costante dei ventilatori interni, durante le prove sperimentali, è essenziale per garantire una distribuzione uniforme della CO₂, evitando stratificazioni che potrebbero compromettere l'omogeneità delle misurazioni.

L'analisi della velocità dell'aria ha confermato che, sebbene le variazioni di velocità siano contenute entro valori accettabili, è cruciale monitorare e regolamentare i ricambi orari per garantire il comfort termico degli occupanti.

Purtroppo, la caratterizzazione della camera ha incontrato alcune limitazioni significative. In primo luogo, la parete verde, elemento cruciale per valutare l'assorbimento di CO₂ da parte delle piante, non è arrivata in tempo per essere installata in camera ed inclusa nelle prove sperimentali. Questo ha impedito di ottenere dati concreti sull'efficacia della parete verde nel ridurre la concentrazione di CO₂ e migliorare la qualità dell'aria all'interno della camera climatica.

Inoltre, a causa dei tempi ristretti, non è stato possibile completare le prove di velocità dell'aria per tutti i tassi di ricambi orari previsti, così come non è stato possibile fare le rilevazioni nella zona del diffusore di mandata. Queste limitazioni hanno comportato una parziale raccolta di informazioni. Tuttavia, i dati raccolti finora forniscono una base solida per future ricerche e miglioramenti, e le prove mancanti rappresentano un'opportunità per ulteriori approfondimenti in progetti successivi.

La priorità principale è l'integrazione della parete verde non appena disponibile. Sarà fondamentale condurre prove sperimentali per valutare l'efficacia dell'assorbimento di CO₂ da parte delle piante. Questi esperimenti potranno fornire dati preziosi per comprendere meglio il ruolo delle piante nel migliorare la qualità dell'aria e nel contribuire alla sostenibilità ambientale.

Sarà necessario completare le prove di velocità dell'aria per tutti i valori di n e per la mandata dell'aria. Questo permetterà di ottenere una mappatura completa e dettagliata del comportamento del flusso d'aria, fondamentale per l'ottimizzazione del sistema di ventilazione e per garantire un comfort termico uniforme.

Con i dati raccolti, si potranno sviluppare sistemi per il controllo e la regolazione in tempo reale della ventilazione. Questi sistemi dovrebbero essere programmati per analizzare continuamente i dati ambientali, come la concentrazione di CO₂, la temperatura, l'umidità e la velocità dell'aria, al fine di mantenere condizioni ottimali all'interno dell'ambiente.

Infine, potrebbe essere interessante analizzare l'impatto energetico della camera, in particolare dei sistemi implementati per ottimizzare l'isolamento e la ventilazione, valutando l'influenza di questi sistemi sul consumo energetico totale e realizzando un'analisi costi-benefici.

Bibliografia

- [1] Ministero della Salute: ‘NUOVE EVIDENZE A SUPPORTO DEL DOCUMENTO “INQUINAMENTO ATMOSFERICO E CAMBIAMENTI CLIMATICI Elementi per una strategia nazionale di prevenzione” Aggiornamento 2023’.
- [2] J. Saini, M. Dutta, and G. Marques, ‘A comprehensive review on indoor air quality monitoring systems for enhanced public health’, *Sustainable Environment Research*, vol. 30, no. 1. BioMed Central Ltd, 2020. doi: 10.1186/s42834-020-0047-y.
- [3] A. Nandan, N. A. Siddiqui, C. Singh, and A. Aeri, ‘Occupational and environmental impacts of indoor air pollutant for different occupancy: a review’, *Toxicology and Environmental Health Sciences*, vol. 13, no. 4. Korean Society of Environmental Risk Assessment and Health Science, pp. 303–322, Dec. 01, 2021. doi: 10.1007/s13530-021-00102-9.
- [4] B. W. Olesen and G. S. Brager, ‘UC Berkeley Indoor Environmental Quality (IEQ) Title Publication Date’, 2004. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/2m34683k>
- [5] J. Van Hoof, ‘Forty years of Fanger’s model of thermal comfort: Comfort for all?’, *Indoor Air*, vol. 18, no. 3, pp. 182–201, 2008, doi: 10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x.
- [6] R. Yao *et al.*, ‘Evolution and performance analysis of adaptive thermal comfort models – A comprehensive literature review’, *Build Environ*, vol. 217, p. 109020, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.109020.
- [7] F. Romana D’ and A. Alfano, ‘La qualità degli ambienti confinati non industriali: il discomfort termoigrometrico’, 2004. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/242717911>
- [8] L. Zaniboni and R. Albatici, ‘Natural and Mechanical Ventilation Concepts for Indoor Comfort and Well-Being with a Sustainable Design Perspective: A Systematic Review’, *Buildings*, vol. 12, no. 11. MDPI, Nov. 01, 2022. doi: 10.3390/buildings12111983.
- [9] ‘SIGA_Sicrall_dati_tecnici_prodotto_PDS_it’.
- [10] ‘HOBO® MX CO 2 Logger (MX1102A) Manual’. [Online]. Available: www.onsetcomp.com
- [11] ‘UNITÀ DI RECUPERO CALORE AD ALTISSIMA EFFICIENZA’, 2020.
- [12] ‘NEMA 24 I-Grade Motor/Encoder’, 2016. [Online]. Available: www.QuickSilverControls.com
- [13] Pag, ‘Corso: Misure Meccaniche e Collaudo TEORIA DEL FILO CALDO’.
- [14] ‘DeltaOHM_HD2903_datasheet_ITA’.

[15] 'GE Sensing LPM/LPX 5000 Series'.

*Ringrazio tutti coloro che
mi hanno supportato e motivato
in questo percorso*