



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

**ANALISI SPERIMENTALE DELLA VENTILAZIONE IN  
UN'AULA UNIVERSITARIA IN TEMPI DI COVID-19**

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF VENTILATION IN A  
UNIVERSITY CLASSROOM IN TIMES OF COVID-19**

Relatore:  
*Chiar.mo Prof. Costanzo Di Perna*

Tesi di Laurea di:  
*Emanuele Rossi*

Correlatore:  
*Dott. Ing. Luca Tarabelli*

A.A. 2020 / 2021

# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>4</b>
<b>CAPITOLO 1. QUALITA' DELL'ARIA IN TEMPI DI COVID-19</b> .....	<b>6</b>
1.1. COVID19 .....	6
1.2. TRASMISSIONE AEREA DA COVID-19 .....	6
1.3. STIMA DELL'EMISSIONE VIRALE .....	9
<b>CAPITOLO 2. MEZZI PER RIDURRE LA TRASMISSIONE</b> .....	<b>18</b>
2.1. LA VENTILAZIONE .....	18
2.2. ULTRAVIOLETTO .....	21
2.3. FILTRAZIONE .....	23
2.4. IONIZZAZIONE BIPOLARE .....	31
<b>CAPITOLO 3. FATTORI AMBIENTALI CHE INFLUENZANO LA TRASMISSIONE</b> .....	<b>33</b>
3.1. UMIDITÀ RELATIVA .....	33
3.1.1. Ruolo dell'umidità relativa nella trasmissione .....	34
3.1.2. Confronto del rapporto UR esterna con UR interna .....	37
3.2. VELOCITÀ DELL'ARIA .....	38
3.3. TEMPERATURA DELL'ARIA .....	42
3.4. PORTATA D'ARIA .....	44
3.5. COMFORT .....	46
<b>CAPITOLO 4. IMPIANTO DI VMC</b> .....	<b>51</b>
4.1. COSA È UN IMPIANTO DI VMC .....	51
4.2. FUNZIONAMENTO DI UN IMPIANTO DI VMC .....	52
4.3. TIPOLOGIE DI IMPIANTI DI VMC .....	53
4.4. IMPIANTI DECENTRALIZZATI E CENTRALIZZATI .....	55
<b>CAPITOLO 5. COMPONENTI DELLA VMC</b> .....	<b>59</b>
5.1. RECUPERATORE DI CALORE .....	59
5.2. FILTRI .....	62
5.3. CANALI DI DISTRIBUZIONE .....	63
5.5. SILENZIATORI .....	65
5.6. SISTEMA DI REGOLAZIONE E TARATURA .....	65
5.7. SERRANDE TAGLIAFUOCO .....	65
<b>CAPITOLO 6. CASO DI STUDIO</b> .....	<b>66</b>
6.1. INTRODUZIONE AL CASO DI STUDIO .....	66
6.2. ANALISI IMPIANTO .....	67
<b>CAPITOLO 7. MONITORAGGIO</b> .....	<b>73</b>
7.1. METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE .....	73
7.3. RILIEVO RTD ACCESO .....	77
<b>CAPITOLO 8. ANALISI DI RISCHIO</b> .....	<b>82</b>
8.1. RISCHIO LEGATO ALL'UMIDITÀ RELATIVA .....	82
8.2. RISCHIO LEGATO ALLA VELOCITÀ DELL'ARIA .....	83
8.3. RISCHIO LEGATO ALLA TEMPERATURA .....	84
8.4. RISCHIO LEGATO ALLA PORTATA .....	85
8.5. RISCHIO LEGATO ALLA CO2 .....	90
<b>CAPITOLO 9. CONCLUSIONI</b> .....	<b>91</b>

<b><i>BIBLIOGRAFIA</i></b> .....	<b>92</b>
<b><i>RINGRAZIAMENTI</i></b> .....	<b>98</b>

## ***INTRODUZIONE***

La vita di tutti noi è stata stravolta da quando nel mondo è comparso il virus Sars-CoV-2, denominato più comunemente COVID-19. È riuscito a mettere in ginocchio un mondo intero, costringendoci a restare chiusi in casa, lontano da persone care, molte delle quali ritenute le più vulnerabili come i nostri nonni oppure familiari che, chi per lavoro chi per studio, è stato lontano dalla famiglia anche nei giorni di festa dove stare in famiglia è tutto. Abbracciarsi, stringersi la mano, scambiarsi un bacio, stare in contatto con persone esterne alla propria famiglia sono tutte azioni che ci sono state vietate per combattere e cercare diminuire il contagio, per aiutare chi lottava e lotta tutt'ora in prima linea negli ospedali: medici e infermieri.

Questo ha portato le persone a trascorrere più tempo dentro casa e quindi a sensibilizzarsi sulla qualità dell'aria interna perché, come afferma l'Istituto Superiore di Sanità (ISS), il rischio maggiore, per quanto riguarda il contagio da Sars-Cov-2, è costituito dalla trasmissione per via aerea mentre la possibilità di contagio tramite contatto con superfici infette è molto rara. Diversi studi confermano questo aspetto e spiegano come al variare di alcuni parametri ambientali (umidità relativa, velocità dell'aria, temperatura e portata d'aria) il rischio di trasmissione aerea può aumentare o diminuire. Questo perché i parametri elencati, vanno ad influire su quelle che sono le principali responsabili del contagio per via aerea, ovvero le goccioline di saliva che noi espelliamo anche solo respirando. Le condizioni ambientali indoor, generate da questi parametri, regolano l'aspetto più importante: la permanenza delle goccioline, e quindi del virus nell'aria. Più è lunga questa permanenza e più il rischio aumenta.

Se si parla delle condizioni ambientali indoor, e quindi del trovare il giusto equilibrio tra i parametri che lo regolano al fine di ridurre il rischio, non possiamo far altro che affidarci alla ventilazione, sia naturale che meccanica. In questo lavoro si andrà a parlare della sola ventilazione meccanica controllata perché le normative in materia di COVID, impongono portate quasi impossibili da poter rispettare con la sola ventilazione naturale.

Ciò fa sì che l'impianto di ventilazione meccanica, rientri tra le "tecnologie" fondamentali volte al diminuire la diffusione e trasmissione del virus negli ambienti affollati, come lo è un'aula universitaria; ovvero il caso di studio oggetto di sperimentazione.

L'obiettivo di questo lavoro è valutare, tramite il monitoraggio e i rilievi dei parametri ambientali, le percentuali di rischio di trasmissione da COVID-19 in un'aula universitaria munita di un impianto di ventilazione meccanica accoppiata a due recuperatori di calore RTD11. Per conoscere il reale vantaggio, in termini di rischio che l'impianto apporta all'interno dell'aula, bisogna confrontarlo con una situazione in assenza di ventilazione, ovvero ad impianto spento. Solo così si può conoscere l'effettivo grado di rischio.

Con l'installazione di un impianto di ventilazione meccanica, tra i vantaggi, c'è sicuramente il comfort termico, che sino ad oggi è stato l'obiettivo principale, se non l'unico, da raggiungere. Il periodo, ci dimostra che all'interno di uno spazio chiuso il solo comfort termico non può essere l'unico obiettivo da conseguire ma bisogna tener conto di quella che è la salubrità e la qualità dell'aria che noi respiriamo, anche quando questo virus scomparirà per poter ridurre l'impatto da future malattie virali.

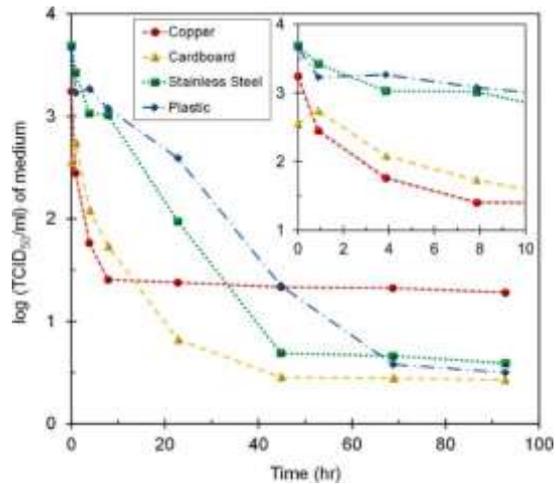
# ***CAPITOLO 1. QUALITA' DELL'ARIA IN TEMPI DI COVID-19***

## ***1.1. COVID19***

Il nuovo coronavirus (SARS-CoV-2) è un nuovo ceppo della famiglia CoV che non è stato precedentemente identificato nell'uomo. L'emergere di COVID-19, la malattia causata da SARS-CoV-2 alla fine del 2019 a Wuhan, in Cina, ha creato una pandemia che ha portato a sforzi scientifici, economici e pubblici su larga scala per contenere la trasmissione virale. Al 6 ottobre 2021, un rapporto sulla situazione dell'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) afferma che sono stati identificati oltre 235 milioni di casi confermati e circa 5 milioni di decessi in 217 paesi o regioni. Finora, il nuovo CoV viene trasmesso direttamente da persona a persona, tra le altre vie. Dopo quasi due anni dall'inizio è ancora una dolorosa e costante presenza nella nostra vita quotidiana, mettendo in risalto evidenti lacune e debolezze rendendo lo sviluppo in ogni Paese incontrollato. Da questa dura lezione abbiamo però anche imparato che, a livello individuale, alcuni comportamenti possono aumentare o diminuire il rischio di contagio e che, in un ambito più ampio di comunità, esistono degli accorgimenti per rendere la nostra vita sociale più sicura anche quando questo virus sarà solo un triste e lontano ricordo. Il modo migliore per affrontare la pandemia di CoV è semplicemente ridurre il rischio di essere infettati dal virus bloccando le vie di trasmissione.

## ***1.2. Trasmissione aerea da COVID-19***

Gli agenti patogeni, inclusi i virus, sono in grado di diffondersi ed essere trasmessi per vie ambientali, comprese l'aria e le superfici inerti o indirettamente attraverso il contatto con una superficie contaminata [1]. Secondo uno studio pubblicato sul New England Journal of Medicine, SARS-CoV-2 può vivere sulle superfici per diverse ore o giorni, a seconda del materiale della superficie (*Fig. 1*), in modo simile al SARS-CoV-1 [2].



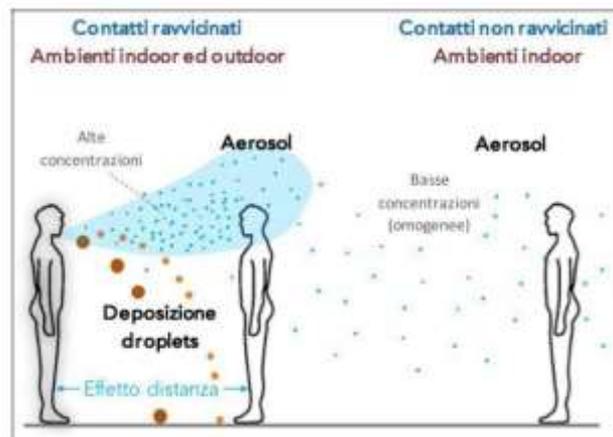
(Fig. 1). Viabilità di SARS-CoV-2 su varie superfici in base ai dati riportati da van Doremalen.

A questo proposito, evitare il contatto ravvicinato con chiunque mostri sintomi di COVID-19, come tosse, starnuti, febbre e difficoltà respiratorie, è fortemente raccomandato da varie agenzie di controllo delle infezioni. L'OMS esorta tutti, in particolare quelli nelle aree ad alto rischio, a prevenire la diffusione dell'infezione attraverso il lavaggio regolare delle mani e l'uso di maschere facciali o altre barriere di trasmissione fisica. Tuttavia, l'efficacia di queste azioni preventive è limitata, in particolare negli ambienti interni in cui l'aria circolante bio contaminata o le superfici frequentemente toccate possono mediare la trasmissione.

Anche fattori come la corrente d'aria, la temperatura e l'umidità possono influenzare i tassi di trasmissione del virus. Tracce del SARS-CoV-2 sono state rilevate per la prima volta nell'acqua non potabile di Parigi, che viene utilizzata per pulire le strade e per irrigare i parchi. Più recentemente, vari studi hanno identificato l'RNA SARS-CoV-2, e non la particella infettiva, nelle acque reflue municipali in diversi paesi; tuttavia, finora non ci sono prove della trasmissione di COVID-19 attraverso l'acqua contaminata [3].

Come affermato dal Ministero della Salute, Centers for Disease Control (CDC) e Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), la principale via di trasmissione del coronavirus SARS-CoV-2 è attraverso le goccioline respiratorie, quelle grandi (*droplet*) e piccole (*aerosol*) che espelliamo mentre tossiamo, starnutiamo, urliamo o semplicemente parliamo e respiriamo (Fig. 2).

Non a caso le mascherine che fungono da barriera meccanica verso le particelle infettive rappresentano uno dei principali pilastri nella lotta alla pandemia di COVID-19, assieme al distanziamento sociale e al frequente lavaggio delle mani con acqua e sapone o un gel idroalcolico.



(Fig. 2). Schema diffusione Aerosol

Da questa figura si può notare come il distanziamento svolge una funzione molto importante per quanto riguarda la trasmissione perché la concentrazione di particelle contaminate è inversamente proporzionale al distanziamento sociale.

Esistono prove schiaccianti che l'inalazione rappresenta una delle principali vie di trasmissione del COVID 19. C'è un urgente bisogno di armonizzare le discussioni sulle modalità di trasmissione del virus tra le discipline per garantire le strategie di controllo più efficaci e fornire una guida chiara e coerente al pubblico. Per fare ciò, dobbiamo chiarire la terminologia per distinguere tra aerosol e goccioline utilizzando una soglia dimensionale di 100  $\mu\text{m}$ , non gli storici 5  $\mu\text{m}$ . Questa dimensione separa più efficacemente il loro comportamento aerodinamico, la capacità di essere inalati e l'efficacia degli interventi. I virus in goccioline (più grandi di 100  $\mu\text{m}$ ) cadono in genere a terra in pochi secondi entro 2 m dalla fonte e possono essere spruzzati come minuscole palle di cannone sugli individui vicini [4].

A causa del loro raggio di viaggio limitato, la distanza fisica riduce l'esposizione a queste goccioline.

I virus negli aerosol (inferiori a 100  $\mu\text{m}$ ) possono rimanere sospesi nell'aria per molti secondi o ore, viaggiare per più di 2 metri, come il fumo, essere inalati e accumularsi nell'aria interna degli spazi chiusi scarsamente ventilati, portando a eventi di super-diffusione [5], ovvero una sola persona positiva ne contagia molte altre [6]. Sono altamente concentrati vicino a una persona infetta, quindi possono infettare più facilmente le persone nelle immediate vicinanze pur se possono percorrere più di 2 metri. Gli individui con COVID-19, molti dei quali non hanno sintomi, rilasciano migliaia di aerosol carichi di virus e molte meno goccioline quando respirano e parlano [7,8] pertanto, è molto più probabile che si inalino aerosol piuttosto che goccioline [9], e quindi l'equilibrio dell'attenzione deve essere spostato sulla protezione dalla trasmissione per via aerea. Oltre ai mandati esistenti di indossare maschere, allontanamento sociale e sforzi igienico-sanitari, l'ideale sarebbe migliorare l'aria interna mediante ventilazione e filtrazione.

La comunità scientifica sta ancora studiando le modalità di contagio del virus COVID-19 ma al momento, come sopra citato, la principale via di trasmissione accertata è rappresentata dalle goccioline di saliva (droplet e aerosol) disperse nell'ambiente da chi è contagiato. Sono stati condotti vari studi sulla sopravvivenza dei patogeni trasportati dall'aria [10,11,12] che confermano la pericolosità dell'aerosol.

Il virus SARS-CoV-2 ha dimostrato di essere stabile nelle particelle sospese nell'aria con un'emivita di oltre un'ora [2], quindi può essere potenzialmente inalato da individui suscettibili che causano infezione e ulteriore diffusione della malattia. In un ambiente indoor, è sempre consigliabile un frequente ricambio dell'aria ancor più efficace se associato ad una disinfezione delle superfici con soluzioni a base alcolica. La disinfezione dovrà interessare anche le parti accessibili degli impianti di condizionamento.

### ***1.3. Stima dell'emissione virale***

Come sappiamo, le attività umane espiratorie generano goccioline, che possono anche trasportare virus attraverso i processi di atomizzazione che si verificano nel tratto respiratorio, quando sufficientemente si raggiungono alte velocità.

Il contenuto di agenti infettivi espulsi da una persona infetta dipende, tra gli altri fattori, dalla posizione all'interno delle vie respiratorie da cui hanno avuto origine le goccioline. In particolare, vengono espulse ad una velocità sufficientemente elevate per l'atomizzazione, soprattutto in tratti respiratori che sono notevolmente ristretti. La parte anteriore della bocca è il sito di restringimento e quindi è il sito più importante per l'atomizzazione; poiché la maggior parte delle goccioline ha origine nella parte anteriore della bocca e in misura minore dalla laringe [13] la concentrazione di un agente infettivo in bocca (espettorato) è rappresentativo della concentrazione di agenti infettivi. Pertanto, la conoscenza della dimensione e dell'origine delle goccioline è importante per comprendere il trasporto del virus attraverso la via dell'aerosol. Contrariamente ai risultati delle prime indagini, [14] gli studi successivi che hanno coinvolto tecniche di rilevamento ottico delle particelle, hanno suggerito che la maggior parte di queste particelle si trova nel sub-micrometro [15]. Più recentemente, la crescente disponibilità di metodi di visualizzazione temporale e spaziale più elevati utilizzando telecamere ad alta velocità e soprattutto, contatori di particelle sempre più accurati hanno permesso la caratterizzazione dettagliata e la quantificazione delle goccioline espulse durante varie forme di flussi di espirazione respiratoria umana (es. respiro, conteggio sussurrato, conteggio sonoro, vocalizzazione non modulata, tosse). Pertanto, negli ultimi anni si è verificato un notevole sviluppo sia nelle tecniche di rilevazione della carica virale in bocca sia nell'area ingegneristica della simulazione numerica della trasmissione per via aerea della carica virale emessa. Tuttavia, il problema della stima della carica virale emessa, fondamentale per la simulazione della trasmissione per via aerea, non è stato ancora risolto. Si tratta di una “funzione di trasferimento” mancante che consentirebbe di collegare l'area virologica, relativa ai valori di carica virale in bocca, con le aree di scienza dell'aerosol e di ingegneria, interessate alla diffusione e mitigazione delle particelle contagiose. Sulla base dell'approccio proposto, i dati sul tasso di emissione dei quanti di SARS-CoV-2 sono stati calcolati in funzione delle diverse attività respiratorie, parametri respiratori e livelli di attività.

Il quanta o “quantum” viene definito come la dose infettante che è in grado di infettare il 63,2% di individui suscettibili. I dati sul tasso di emissione dei quanti, a partire dalla carica virale recentemente documentata nell'espettorato (espressa in copie  $\text{ml}^{-1}$ ), sono stati poi applicati in un modello di rischio di infezione [16] riconosciuto per indagare l'efficacia delle misure di contenimento attuate dal governo italiano per ridurre la diffusione di SARS-CoV-2. In particolare, è stata simulata la trasmissione aerea di SARS-CoV-2 da parte di un soggetto asintomatico all'interno di farmacie, supermercati, ristoranti, banche e uffici postali, ed è stata stimata la riduzione del numero medio di persone infettate da una persona contagiosa ma asintomatica ( $R_0$ ).

**Stima del tasso di emissione dei quanta**

L'approccio si basa sull'ipotesi che le goccioline emesse dal soggetto infetto abbiano la stessa carica virale dell'espettorato. Pertanto, se si conosce la concentrazione del virus nell'espettorato e la quantità di goccioline emesse con dimensioni inferiori a  $10 \mu\text{m}$ , la carica virale emessa può essere determinata mediante un bilancio di massa. In particolare, la carica virale emessa è espressa in termini di tasso di emissione dei quanti ( $ER_q$ , quanti  $\text{h}^{-1}$ ) (un quanta è definito come la dose di nuclei di goccioline trasportate dall'aria necessaria per causare l'infezione nel 63,2% delle persone suscettibili) e viene valutata come:

$$ER_q = C_v * C_{io} * V_{br} * N_{br} * \int_0^{10\mu\text{m}} N_d(D) * V_d(D) dD \quad (1)$$

dove  $C_v$  è la carica virale nell'espettorato (copie di RNA  $\text{ml}^{-1}$ ),  $C_{io}$  è un fattore di conversione definito come il rapporto tra un quanta infettivo e la dose infettiva espressa in copie di RNA virale,  $V_{br}$  è il volume di aria espirata per respiro ( $\text{cm}^3$ ; noto anche come volume corrente),  $N_{br}$  è la frequenza respiratoria (respiro  $\text{h}^{-1}$ ),  $N_d$  è la concentrazione del numero di goccioline ( $\text{part. cm}^{-3}$ ), e  $V_d$  è il volume di una singola goccia (mL) in funzione del diametro della goccia ( $D$ ).

Il volume della gocciolina ( $V_d$ ) è determinato sulla base dei dati ottenuti sperimentalmente [17]: hanno misurato la distribuzione dimensionale delle goccioline per diverse attività respiratorie (es. respirazione, conteggio sussurrato, conteggio sonoro, vocalizzazione non modulata), riconoscendo che tali goccioline presentano una o più modalità che si verificano a diverse concentrazioni. Pertanto, il volume totale delle goccioline è stato calcolato moltiplicando la distribuzione del numero di goccioline per il volume di una sfera corrispondente a ciascun diametro della distribuzione dimensionale. In particolare, nello studio è stata considerata una distribuzione granulometrica con quattro canali con diametri medi di  $D_1=0,8$ ;  $D_2=1,8$ ;  $D_3=3,5$  e  $D_4=5,5$   $\mu\text{m}$ . Ad esempio, è stato riconosciuto che la vocalizzazione non modulata produce particelle aggiuntive in modalità vicine a 3,5 e 5,5  $\mu\text{m}$ . I dettagli delle concentrazioni di aerosol ai quattro canali della distribuzione dimensionale durante ciascuna attività respiratoria sono riportati in (Fig. 3). I diametri del punto medio di ciascun canale sono stati utilizzati per calcolare il volume corrispondente delle goccioline. Gli autori sottolineano che l'attività respiratoria espiratoria è una respirazione a ritmo naturale con inspirazione dal naso ed espirazione dalla bocca.

Attività respiratoria	$D_1$ (0,80 $\mu\text{m}$ )	$D_2$ (1,8 $\mu\text{m}$ )	$D_3$ (3,5 $\mu\text{m}$ )	$D_4$ (5,5 $\mu\text{m}$ )
Conteggio sonoro	0.236	0,068	0.007	0,011
Conteggio sussurrato	0.110	0,014	0.004	0.002
Vocalizzazione non modulata	0,751	0,139	0,139	0,059
Respirazione	0,084	0.009	0.003	0.002

(Fig. 3). Concentrazione di goccioline dei diversi canali in funzione dell'attività respiratoria

### **Modello del rischio di infezione**

La simulazione della trasmissione aerea di SARS-CoV-2 è stata eseguita adottando la valutazione del rischio di infezione tipicamente implementata per valutare le dinamiche di trasmissione delle malattie infettive e per prevedere il rischio di queste malattie al pubblico. Il modello considerato per quantificare il rischio di infezione trasmessa per via aerea è stato realizzato da Gammaitoni e Nucci [16] che rappresenta un aggiornamento di un precedente modello.

Questo modello è stato adottato con successo in precedenti lavori che stimavano il rischio di infezione dovuto ad altre malattie (es. influenza, SARS, tubercolosi, rinovirus) in diversi microambienti indoor come aeroplani, automobili e ospedali. Il modello Gammaitoni e Nucci si basa sulla velocità di variazione dei livelli dei quanti nel tempo; in particolare, le equazioni differenziali per la variazione dei quanti in un volume di controllo nonché le condizioni iniziali (qui non riportate per brevità) hanno permesso di valutare la concentrazione dei quanti in un ambiente interno al tempo  $t$ ,  $n(t)$ , come:

$$n(t) = \frac{ERq \cdot I}{IVRR \cdot V} + \left( n_0 + \frac{ERq \cdot I}{i_0 \cdot IVRR} \right) * \frac{e^{-i_0 IVRR \cdot t}}{V} * (\text{quanta } m^{-3}) \quad (2)$$

dove  $IVRR$  ( $h^{-1}$ ) rappresenta il tasso di rimozione del virus infettivo nello spazio indagato,  $n_0$  rappresenta il numero iniziale di quanti nello spazio,  $I$  è il numero di soggetti infetti,  $V$  è il volume dell'ambiente interno considerato, e  $ER_q$  è il tasso di emissione dei quanti ( $\text{quanta } h^{-1}$ ) caratteristico della specifica malattia/virus in esame. Il tasso di rimozione del virus infettivo ( $IVRR$ ) è la somma di tre contributi [18]: il tasso di ricambio dell'aria (AER) per ventilazione, la deposizione di particelle sulle superfici ( $k$ , ad esempio tramite sedimentazione gravitazionale), e l'inattivazione virale ( $\lambda$ ). I valori AER sono stati selezionati in base ai calcoli (Tabella 1), mentre sono stati scelti valori costanti per la velocità di deposizione ( $k$ ) e l'inattivazione virale ( $\lambda$ ). In particolare, il tasso di deposizione è stato valutato come rapporto tra la velocità di sedimentazione delle particelle super-micrometriche (circa  $1,0 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ ) [19] e l'altezza della sorgente di emissione (1,5 m), quindi  $k$  è risultato pari a  $0,24 \text{ h}^{-1}$ . L'inattivazione virale è stata valutata sulla base dell'emivita di SARS-CoV-2 (1,1 h) rilevata [2], quindi  $\lambda$  risultava pari a  $0,63 \text{ h}^{-1}$ .

		Farmacia	Supermercato	Ristorante	Ufficio postale	Banca
Dimensioni	Superficie ( $A, m^2$ )	21	600	100	100	30
	Altezza ( $h, m$ )	3	3	3	3	3
	Volumi ( $V, m^3$ )	71	1800	300	300	130
Scenario di esposizione prima del blocco (B)	Numero di lavoratori	3 (sempre presenti)	10 (sempre presenti)	4 (solo i camerieri, sempre presenti)	3 (sempre presenti)	4 (sempre presenti)
	Numero e attività dei clienti	- 1 nuovo cliente al minuto che entra in farmacia. - ogni cliente rimane 10 min all'interno (compreso il tempo di attesa). - quindi, sono presenti 10 clienti contemporaneamente	- 1 nuovo cliente ogni 30 s che entra nel supermercato. - ogni cliente rimane 10 min all'interno. - quindi, 90 clienti sono presenti contemporaneamente	- 40 clienti ogni 1,5 h. - entrano in funzione per 1 h (ora). - quindi, 80 clienti sono contemporaneamente presenti per un numero totale di 100 clienti per serata.	- 1 nuovo cliente ogni 15 s che entra nell'ufficio postale. - ogni cliente rimane all'interno 15 min (compreso il tempo di attesa). - quindi, 30 clienti sono presenti contemporaneamente	- 1 nuovo cliente al minuto che entra in banca. - ogni cliente rimane all'interno 15 min (compreso il tempo di attesa). - quindi, 15 clienti sono presenti contemporaneamente
	Tasso di ricambio d'aria (AER, $h^{-1}$ ) per ventilazione naturale (NV)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Tasso di ricambio d'aria (AER, $h^{-1}$ ) per ventilazione meccanica (MV)	2,2	1,1	4,0	2,4	2,4
	Tempo di esposizione totale	3 ore e 10 minuti	3 h e 30 min.	3 ore	3 ore e 15 minuti	3 ore e 15 minuti
Scenario di esposizione dopo il lockdown (A)	Numero di lavoratori	3 (sempre presenti)	10 (sempre presenti)	-	4 (sempre presenti)	4 (sempre presenti)
	Numero e attività dei clienti	- 2 nuovi clienti ogni cinque minuti che entrano in farmacia. - ogni cliente rimane 5 min all'interno. - persone costrette a fare la fila fuori dalla farmacia. - quindi, sono presenti 2 clienti contemporaneamente	- 1 nuovo cliente al minuto che entra nel supermercato. - ogni cliente rimane 10 min all'interno. - persone costrette a fare la fila fuori dal supermercato. - quindi, sono presenti 10 clienti contemporaneamente	-	- 4 nuovi clienti ogni cinque minuti che entrano nell'ufficio postale. - ogni cliente rimane 10 min all'interno. - persone costrette a fare la fila fuori dall'ufficio postale. - quindi, sono presenti 4 clienti contemporaneamente	- 4 nuovi clienti ogni cinque minuti che entrano in banca. - ogni cliente rimane 10 min all'interno. - persone costrette a fare la fila fuori dalla banca. - quindi, sono presenti 4 clienti contemporaneamente
	Tasso di ricambio d'aria (AER, $h^{-1}$ ) per ventilazione naturale (NV)	0,3	0,2	-	0,3	0,3
	Tasso di ricambio d'aria (AER, $h^{-1}$ ) per ventilazione meccanica (MV)	2,3	1,1	-	2,4	2,4
	Tempo di esposizione totale	3 ore e 5 minuti	3 ore e 10 minuti	3 ore	3 ore e 10 minuti	3 ore e 10 minuti

(Tabella 1). Scenari di esposizione per i vari ambienti.

L'equazione (2) è stata derivata considerando le seguenti ipotesi semplificative: il tasso di emissione dei quanti è considerato costante, il periodo di latenza della malattia è più lungo della scala temporale del modello e le gocce sono istantaneamente e uniformemente distribuite nella stanza come da modello di Gammaitoni e Nucci. Quest'ultimo rappresenta un presupposto fondamentale per l'applicazione del modello in quanto ritiene che l'aria sia ben miscelata all'interno dello spazio modellato. Buonanno evidenzia che nella modellazione epidemica, dove l'obiettivo è la diffusione della malattia nella comunità, è impossibile specificare le geometrie, la ventilazione e le posizioni delle fonti infettive in ciascun microambiente. Pertanto, adottare l'ipotesi ben mista è generalmente più ragionevole che ipotizzare ambienti e scenari specifici perché i risultati devono essere interpretati su base statistica.

Per determinare il rischio di infezione ( $R$ , %) in funzione del tempo di esposizione ( $t$ ) delle persone suscettibili, la concentrazione dei quanti è stata integrata nel tempo attraverso l'equazione di Wells-Riley [20] come:

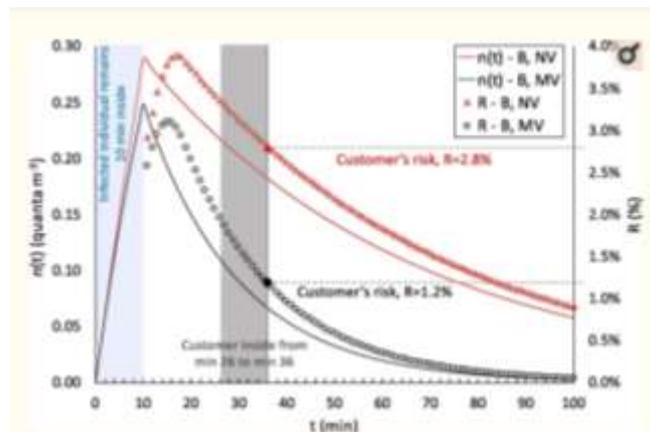
$$\mathbf{R} = (1 - e^{-IR \int_0^T n(t) dt}) (\%) \quad (3)$$

dove  $IR$  è la velocità di inalazione del soggetto esposto (che è, ancora una volta, influenzata dal livello di attività del soggetto) e  $T$  è il tempo totale di esposizione (h). Dal rischio di infezione  $R$ , il numero di persone suscettibili infettate dopo il tempo di esposizione può essere facilmente determinato moltiplicandolo per il numero di individui esposti. Infatti, le equazioni (2), (3) sono state adottate per valutare il rischio di infezione di diversi scenari di esposizione dei microambienti italiani di seguito riportati. La velocità di inalazione dei soggetti esposti nelle simulazioni dei diversi scenari è stata considerata come il valore medio tra l'attività fisica in piedi e quella leggera ( $IR = 0,96 \text{ h}^{-1}$ ). Il tasso di emissione dei quanti utilizzato nella simulazione dello scenario rappresenta il valore medio ottenuto dalle quattro attività espiratorie (conteggio vocale, conteggio sussurrato, vocalizzazione non modulata, respiro). L' $R_0$  per ogni scenario è stato calcolato moltiplicando il rischio di infezione durante il tempo di esposizione di ciascuna persona suscettibile per il numero delle persone suscettibili esposte.

### **Risultati**

A titolo esemplificativo, la (Fig. 4) mostra l'andamento della concentrazione dei quanti ( $n(t)$ ) e del rischio di infezione ( $R$ ) in funzione del tempo per due diversi scenari di esposizione simulati per la farmacia, ovvero prima del lockdown (B) in condizioni di ventilazione naturale (NV) e meccanica (MV). Le tendenze evidenziano chiaramente che la presenza dell'individuo infetto che rimane all'interno per 10 min porta ad un aumento della concentrazione dei quanti nel volume: in particolare, è stato riconosciuto un picco di concentrazione dei quanti più elevato, come previsto, per ventilazione ridotta (NV) rispetto alla ventilazione meccanica (MV).

Le persone che entrano in farmacia dopo l'individuo infetto sono esposte a una certa concentrazione di quanti durante il loro tempo di 10 minuti, e il rischio risultante per la loro esposizione (valutato attraverso l'equazione (3)) è solo una funzione dell'andamento della concentrazione dei quanti. Ad esempio, le persone che entrano nel microambiente intorno al picco di concentrazione dei quanti corrono un rischio maggiore rispetto alle persone che entrano in farmacia più tardi. La Fig. 4 mostra un esempio di un cliente che entra a min 26 ed esce a min 36: il rischio per questa esposizione di 10 min è del 2,8% in condizioni di ventilazione naturale e dell'1,2% in condizioni di ventilazione meccanica. Durante l'intero tempo di esposizione di tale scenario (3 ore e 10 minuti), 179 clienti (dopo l'individuo infetto) entrano in farmacia e ognuno di loro riceve il proprio rischio. In particolare, il rischio medio dei 179 clienti è dell'1,3% per le condizioni NV e dello 0,4% per le condizioni MV.  $R_0$  varia da 2,34 e 0,80.



(Fig. 4). Concentrazione dei quanta con NV e MV.

Questo studio condotto da Giovanni Buonanno ha proposto il primo approccio volto a colmare il vuoto di conoscenza ancora presente nella letteratura scientifica sulla valutazione della carica virale emessa dagli individui infetti. Queste informazioni potrebbero fornire informazioni chiave per ingegneri ed esperti di qualità dell'aria interna per simulare la dispersione aerea delle malattie negli ambienti interni. A tal fine viene proposto un approccio per stimare il tasso di emissione dei quanta (espresso in  $\text{quanti h}^{-1}$ ) sulla base della carica virale emessa dalla bocca (espressa in copie di RNA in  $\text{ml}^{-1}$ ), tipicamente disponibile dalle analisi virologiche.

Tale approccio tiene conto anche dell'effetto di diversi parametri (tra cui tasso di inalazione, tipo di attività respiratoria e livello di attività) sul tasso di emissione dei quanti. Sono stati riscontrati alti valori di emissione per un soggetto asintomatico SARS-CoV-2 sia nella condizione di esercizio leggero durante il parlato, sia nell'esercizio pesante con respirazione orale.

L'approccio proposto è di grande attualità in quanto rappresenta uno strumento essenziale da applicare negli spazi chiusi ed è in grado di supportare esperti di qualità dell'aria ed epidemiologi nella gestione degli ambienti indoor durante un'epidemia solo conoscendone la carica virale, senza attendere la fine dello scoppio. A tal fine si evidenzia la grande importanza della ventilazione meccanica nei microambienti indoor per ridurre la diffusione dell'infezione.

Anche la ASHRAE ha emanato nuove dichiarazioni in merito:

- La trasmissione aerea di SARS-CoV-2 è significativa e dovrebbe essere controllata. Le modifiche alle operazioni di costruzione, compreso il funzionamento dei sistemi HVAC, possono ridurre le esposizioni aeree.
- La ventilazione e la filtrazione fornite dai sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria possono ridurre la concentrazione nell'aria di SARS-CoV-2 e quindi il rischio di trasmissione attraverso l'aria.

## ***CAPITOLO 2. MEZZI PER RIDURRE LA TRASMISSIONE***

### ***2.1. La ventilazione***

Tra gli strumenti più importanti per la riduzione del rischio di contagio da agenti patogeni aerotrasportati negli ambienti confinati, ci sono senza dubbio gli impianti di ventilazione con i relativi sistemi di filtrazione dell'aria e non solo, anche modificando l'umidità relativa e le portate può diminuire il rischio di contagio. La “contaminazione aerotrasportata” e gli “impianti di ventilazione” sono due tematiche ampiamente dibattute durante i primi mesi della pandemia, purtroppo con argomentazioni spesso lontane dalla realtà e da persone prive delle necessarie conoscenze di base sull'argomento. Il rischio che si è corso, è stato quello di demonizzare presso il grande pubblico ciò che invece, nella realtà, è fonte di vita per noi esseri umani: l'aria.

All'inizio, quando le conoscenze erano ancora limitate, si riteneva che il coronavirus si diffondesse soprattutto attraverso la contaminazione delle superfici da parte di individui inconsapevolmente infetti. Con il tempo, come sappiamo, è emerso invece che si tratta di un virus che si trasmette prevalentemente per via aerea, attraverso le gocce di saliva che emettiamo parlando (droplet) e attraverso quelle ancora più piccole di vapore acqueo che emettiamo respirando e che rimangono a lungo sospese nell'aria (aerosol). Vale la pena ricordare che inizialmente, infatti, era stata esclusa la modalità di contagio per trasmissione mediante aerosol aerotrasportato ma, nonostante ciò, gli impianti HVAC erano stati indicati come elemento amplificatore del rischio di contagio negli ambienti chiusi. A distanza di un anno l'importanza e il ruolo degli impianti di ventilazione sono stati rivalutati, si è capito che la riduzione del rischio di contagio è un processo che prevede diversi accorgimenti sia a livello personale che istituzionale e che, se opportunamente progettati, utilizzati e mantenuti, gli impianti di ventilazione giocano un ruolo fondamentale nella rimozione dei biocontaminanti aerosospesi all'interno degli ambienti chiusi.

La ventilazione è il processo di fornitura di aria esterna a uno spazio o edificio con mezzi naturali o meccanici [21]. Controlla la velocità con cui l'aria della stanza viene rimossa e sostituita per un periodo di tempo. In alcuni casi è necessario rimuovere l'inquinamento dall'aria esterna prima di portarla in un edificio, utilizzando adeguati sistemi di filtrazione. La ventilazione svolge un ruolo fondamentale nella rimozione dell'aria espirata carica di virus, abbassando così la concentrazione complessiva e quindi l'eventuale dose successiva inalata dagli occupanti. Il principio guida centrale è sostituire l'aria contaminata con aria pulita esterna; ciò a volte non è possibile e per sopperire a queste mancanze interviene la ventilazione meccanica. Tuttavia, se il passaggio del flusso d'aria è ostruito (ad esempio chiudendo finestre e porte), la concentrazione di agenti patogeni nell'aria può aumentare bruscamente portando ad un aumento del rischio di trasmissione e infezione per via aerea [22]. Ad esempio, l'OMS a marzo [23] specifica che in un reparto infetto da COVID-19 devono essere forniti almeno 160 L/s/paziente se si utilizza la ventilazione naturale.

La situazione può essere peggiore negli edifici pubblici e in altri spazi condivisi, come negozi, uffici, scuole, asili nido, biblioteche, ristoranti, navi da crociera, ascensori, sale conferenze o trasporti pubblici, dove i sistemi di ventilazione possono variare da sistemi meccanici appositamente progettati a semplicemente porte e finestre aperte. Nella maggior parte di questi ambienti, i tassi di ventilazione sono significativamente inferiori rispetto agli ospedali per vari motivi, tra cui la limitazione dei flussi d'aria per il risparmio energetico e dei costi. Quindi, in tali ambienti, con tassi di ventilazione inferiori, destinati principalmente al controllo della qualità dell'aria interna [24], la probabilità che le persone infette condividano l'aria con occupanti suscettibili è elevata, ponendo un rischio di infezione che contribuisce alla diffusione della malattia infettiva. Con il graduale allentamento delle misure di blocco "soggiorno a casa", gran parte della popolazione potrebbe tornare a trascorrere sempre più tempo in luoghi di lavoro, uffici, scuole e altri edifici pubblici non adeguatamente ventilati, dove potrebbe essere esposta al rischio di contrarre virus e/o infezioni per inalazione.

In un edificio ventilato meccanicamente, l'aria di ventilazione è generalmente fornita da un sistema di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC). A volte, l'aria di ventilazione è fornita da ventilatori dedicati o unità di trattamento dell'aria esterna (UTA). Le strategie di controllo del sistema HVAC possono essere generalmente modificate per aumentare in una certa misura la ventilazione nelle zone occupate, per ridurre i rischi di trasmissione aerea tra gli occupanti.

Tuttavia, questo non avviene tramite un semplice "colpo di un interruttore", poiché i sistemi HVAC sono complessi e solitamente progettati per singoli edifici entro parametri operativi specifici standard. Molti requisiti devono essere considerati oltre alla velocità di ventilazione, compreso il controllo della temperatura, dell'umidità relativa, della distribuzione e della direzione del flusso d'aria. Tali sistemi possono essere personalizzati in modo specifico secondo necessità dagli ingegneri HVAC, ad esempio per ridurre i rischi di trasmissione aerea. In effetti, le linee guida sulla ventilazione di ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating, and Air- Conditioning Engineers), REHVA, SHASE (The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan) sono state appena aggiornate per affrontare la diffusione di COVID-19 [25]. Se la ventilazione è fornita mediante aperture delle finestre (aerazione) o altri mezzi (aperture fisse, ad es. ventilazione naturale), è possibile effettuare una stima della possibile portata esterna utilizzando la norma CEN, EN 16798-7:2017 come metodo di calcolo delle portate. La portata d'aria esterna che si ottiene è fortemente dipendente dalle specifiche condizioni locali (dimensioni delle aperture, posizioni relative, condizioni climatiche e meteorologiche, ecc.) e va valutata caso per caso. Un aspetto che può dividere i pareri della stragrande maggioranza della popolazione è sicuramente la valutazione del ricircolo. Il ricircolo dell'aria è una misura per risparmiare energia, ma occorre prestare attenzione, poiché può trasportare contaminanti aerotrasportati (compresi i virus infettivi) da uno spazio e distribuirli ad altri spazi collegati allo stesso sistema, aumentando potenzialmente il rischio di infezione aerea in aree che altrimenti non sarebbero state contaminate.

Uno studio che modella il rischio di trasmissione dell'influenza per via aerea nelle autovetture ha fornito anche un caso contro il ricircolo dell'aria in tali situazioni [26]. I filtri antiparticolato e le apparecchiature di disinfezione nei flussi d'aria di ricircolo possono ridurre questo rischio, ma devono essere progettati appositamente per controllare il rischio di infezione aerea e necessitano di un servizio regolare per mantenere la loro efficacia. Molti sistemi sono progettati per filtri che hanno lo scopo di rimuovere particelle più grandi che possono influenzare il funzionamento delle apparecchiature e che non sono efficaci nel rimuovere particelle di dimensioni piccole, submicrometriche o micrometriche associate a effetti negativi sulla salute. Nella scelta dei filtri appropriati dovrebbero essere utilizzate le classificazioni dei filtri in base ai metodi di prova, come lo standard ASHRAE 52.2 [27] che fornisce un'indicazione delle prestazioni in funzione della dimensione delle particelle. Seguendo queste considerazioni, durante un'epidemia, inclusa l'attuale pandemia di COVID-19, l'aria non dovrebbe essere ricircolata, per evitare la diffusione di particelle cariche di virus in tutto l'ambiente interno. Per le centrali di trattamento dell'aria a livello di edificio o servendo più zone, è necessario evitare il ricircolo, possibilmente facendo funzionare il sistema con aria esterna al 100%. La disabilitazione del ricircolo può essere ottenuta aprendo solo le serrande dell'aria esterna. Nei sistemi in cui non è possibile, si dovrebbe cercare di massimizzare il livello di aria esterna e applicare il filtraggio o l'irradiazione germicida ultravioletta per rimuovere o disattivare la potenziale contaminazione virale dall'aria ricircolata. In molte strutture sanitarie, il ricircolo dell'aria, non è consentito, sebbene il ricircolo sia comunemente usato per migliorare l'efficienza energetica.

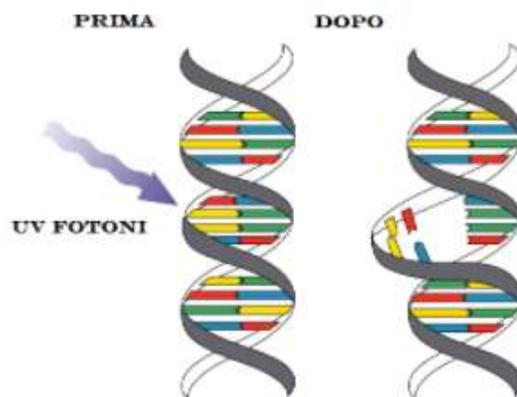
## ***2.2. Ultravioletto***

La radiazione ultravioletta (UV) è una forma di energia elettromagnetica prodotta naturalmente dal sole. Il suo nome significa “oltre il violetto” (dal latino ultra = oltre), perché il violetto è il colore visibile con lunghezza d'onda più corta.

Il suo spettro di luce, appena al di sotto della luce visibile, è suddiviso in quattro zone spettrali distinte:

- Vacuum (100 a 200 nm),
- UV-C (200 a 280 nm),
- UV-B (280 a 315 nm),
- UV-A (315 a 400 nm).

E' una tecnologia in grado di uccidere i virus è quella basata sulla luce ultravioletta, che diversi studi hanno dimostrato essere ampiamente efficace anche contro il patogeno pandemico. “Sappiamo che i raggi UV uccidono i microbi dall'inizio del XX secolo”, ha dichiarato il professor David J. Brenner [28]. Lo scienziato sottolinea che è di uso comune sterilizzare le sale operatorie negli ospedali con luce a 254 nanometri, che rientra nella banda ultravioletta C (UV-C). I raggi ultravioletti distruggono il meccanismo alla base della replicazione virale e risultano molto efficaci (*Fig. 3*). Il problema è che la luce ultravioletta può essere molto dannosa anche per la salute umana; pertanto, si raccomanda di integrarla all'interno dei sistemi HVAC per filtrare l'aria aspirata, oppure di abbassare l'intensità della luce UVC affinché sia sufficiente per uccidere i virus ma non le cellule viventi.



(Fig. 3). Come UV distrugge il DNA della cellula virale

In ambienti in cui è difficile migliorare la ventilazione, l'aggiunta di dispositivi locali di pulizia o disinfezione dell'aria, come l'ultravioletto germicida (GUV o UVGI - irradiazione germicida ultravioletta) può offrire vantaggi. In condizioni di laboratorio GUV ha dimostrato di essere efficace contro una serie di microrganismi, tra cui coronavirus [29], micobatteri [30] e persino influenza [31]. Diversi studi mostrano che l'inattivazione diminuisce con l'aumento dell'umidità sia per gli aerosol batterici [32] che virali [31]. Si è dimostrato [33] che SARS-CoV-1 potrebbe essere inattivato da UV-C. Non ci sono ancora dati per SARS-CoV-2, ma i dati per altri coronavirus suggeriscono che è altamente probabile che sia suscettibile ai raggi UV-C.

Un'applicazione che è cresciuta notevolmente durante le epidemie di tubercolosi multi-resistente degli anni '80, è il sistema della "stanza superiore" in cui le lampade sono posizionate nella parte superiore della stanza, sulle pareti o montato sul soffitto, dirigendo la luce UV nella zona superiore con feritoie e limitando l'esposizione ai raggi UV nello spazio occupato. La GUV (Germicidal Ultraviolet) della stanza superiore è una buona tecnologia da considerare in ambienti affollati e scarsamente ventilati, ovvero dove la capacità di aumentare la ventilazione è limitata, potrebbe verificarsi la trasmissione di aerosol. Molto tempo fa, [34] hanno presentato dati che mostrano l'interruzione della trasmissione dell'influenza in un ambiente ospedaliero. È stato stimato che la GUV della stanza superiore può ridurre il rischio di infezione di una quantità equivalente al raddoppio del tasso di ventilazione [35]. Hanno mostrato [36] una riduzione del 77% della trasmissione da uomo a cavia in un ambiente ospedaliero. Questi concordano con gli studi di modellazione [37, 38] che mostrano, che l'efficacia dipende dal posizionamento delle lampade rispetto al flusso di ventilazione e che l'aggiunta di un ventilatore a soffitto migliora l'efficacia della GUV.

### ***2.3. Filtrazione***

Esistono filtri di diverse tipologie, dimensioni ed efficienze: in grado di essere integrati in ogni tipo di impianto per qualsiasi esigenza di rimozione dei contaminanti e di pulizia dell'aria.

### Classificazione filtri

Il posizionamento all'interno di un impianto e la scelta dell'efficienza dipendono essenzialmente dal compito che ciascun filtro deve svolgere:

- Sezione filtrante nella parte di impianto relativa all'immissione dell'aria esterna che ha la funzione di rimuovere i contaminanti aerodispersi presenti all'esterno dell'edificio, per immettere aria con condizioni di qualità accettabile.
- Sezione filtrante nella parte di impianto destinata al ricircolo dell'aria interna che ha la funzione di rimuovere i contaminanti generati all'interno dell'ambiente stesso, per mantenerne la concentrazione entro dei livelli accettabili.
- Sezioni filtranti usate in impianti con trattamenti localizzati dell'aria secondaria interna che hanno la funzione di rimuovere i contaminanti generati all'interno dello stesso ambiente in cui l'aria viene prelevata, per mantenerne la concentrazione entro dei livelli accettabili.

Ulteriori concetti che sono stati spesso definiti in maniera errata e hanno generato ulteriori pregiudizi da parte del grande pubblico nei confronti degli impianti di condizionamento, sono quelli di “aria di rinnovo” (aria esterna), “aria di ricircolo” e “aria secondaria” (aria trattata localmente, ambiente unico). L'importanza dell'aria di rinnovo risiede nella sua capacità di diluire la concentrazione di contaminanti negli ambienti confinati, senza introdurre ulteriori cariche virali visto che l'aria esterna non contiene il virus o, quantomeno, non con concentrazioni e carica virale tali da rappresentare un mezzo di contagio.

La parte di aria di ricircolo e di aria secondaria è invece necessaria per il contenimento dei consumi energetici; contribuisce anche in parte alla riduzione del rischio individuale di contagio se la scelta dei filtri viene studiata in maniera ottimale e, in funzione del grado di efficienza di filtrazione esistente, è in grado di trattenere parte dei virus eventualmente aerotrasportati dall'aerosol presente in ambiente.

Per prescrivere i metodi di prova e la classificazione per i filtri destinati alla ventilazione generale, dobbiamo far riferimento alla UNI EN ISO 16890 in vigore, in Italia, dal 2017. La classificazione dei filtri, che si basa sulla loro capacità di rimozione del particolato aerodisperso, viene espressa con un valore di efficienza percentuale riferito allo specifico intervallo dimensionale dell'aerosol di riferimento PM1, PM2.5 e PM10. Molto spesso si sarà sentito che organizzazioni come l'OMS discutono sull'inquinamento dell'aria parlandone in termini di concentrazione di PM10, PM2.5 e PM1, cioè di particolato di dimensioni più piccole rispettivamente di 10  $\mu\text{m}$ , 2.5  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ . Ecco perché questa nuova classificazione, tra i diversi vantaggi, facilita la comprensione dei benefici di un filtro presentandoli con termini ormai entrati nel lessico quotidiano di ciascuna persona. Il nuovo standard ISO 16890 si concentra sulla capacità dei sistemi di filtrazione di catturare il particolato di dimensioni simili o inferiori ai 10  $\mu\text{m}$  e gli elementi filtranti vengono classificati in base alla loro abilità di catturare polveri grossolane (particolato più grande di 10  $\mu\text{m}$ ), PM10, PM2.5 e PM1. Questi costituiscono i quattro gruppi di filtri compresi dal nuovo standard. Sapere quindi che, per esempio, un filtro classificato come ISO ePM10 85% lascia passare il 15% del particolato di dimensione fino a 10  $\mu\text{m}$  trattenendone la restante parte, fornisce un'indicazione chiara sul comportamento di quello specifico elemento filtrante nei confronti della qualità dell'aria. Laddove però un'efficienza riferita al particolato con dimensione inferiore ad 1  $\mu\text{m}$  (PM1) possa sembrare più complicata da applicare nella vita reale poiché non sono disponibili dati di qualità dell'aria per questa granulometria di contaminanti, la norma ci supporta riportando che, a prescindere dall'efficienza per la quale il filtro viene classificato, i test devono essere effettuati per l'intero spettro dimensionale da 0.3  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ . In questo modo, per esempio, potremmo sapere che un filtro classificato come ISO ePM1 90 %, oltre ad avere l'efficienza indicata dalla sua classe per il particolato da 0.3 a 1  $\mu\text{m}$ , sarà caratterizzato da valori di efficienza superiori per i contaminanti classificati come PM2.5 e PM10 e tali valori di efficienza sono riportati nei rapporti di prova per la classificazione del singolo modello di filtro.

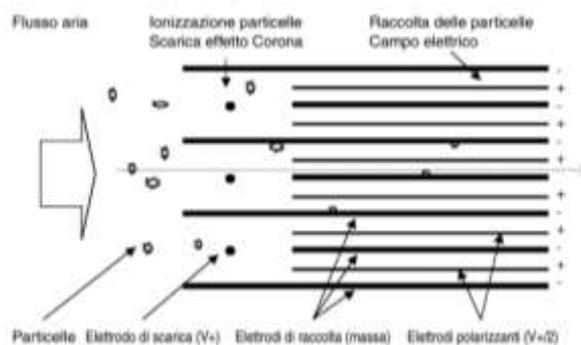
Queste informazioni sono fondamentali per selezionare e dimensionare le sezioni di filtrazione per l'aria esterna e per quella di ricircolo per qualsiasi tipo di impianto di ventilazione, non solo in epoca di emergenza sanitaria ma anche in futuro. L'aria che respiriamo, infatti, contiene contaminanti di diversa origine, concentrazione e pericolosità per la salute delle persone che, anche al termine della pandemia, continueranno ad essere presenti negli ambienti chiusi che frequentiamo e nei quali, mediamente, passiamo oltre l'80% della nostra vita. Sarà quindi necessario mantenere anche in futuro una costante attenzione nei confronti della qualità dell'aria, dal dimensionamento di un impianto fino alla sua corretta manutenzione, facendo sempre affidamento sulle figure professionali esperte del settore.

### **Rimozione contaminanti**

La caratterizzazione del bioaerosol risulta difficoltosa in quanto soggetta a diverse condizioni al contorno legate all'ambiente, oltre che alla dipendenza dal tempo di permanenza al di fuori del corpo umano (circa un'ora). La presenza di un adeguato livello di filtrazione dell'aria esterna, di ricircolo o secondaria unita ad un'adeguata ventilazione, si presenta come la soluzione tecnica fondamentale per ridurre la concentrazione di qualsiasi tipo di contaminante presente nell'aria che respiriamo negli ambienti chiusi. I principali agenti patogeni o comunque biologicamente attivi (funghi, spore, batteri e virus) presentano dimensioni piuttosto variabili che, mediamente, differiscono tra loro anche più di un ordine di grandezza. I contaminanti caratterizzati dalle dimensioni più piccole, generalmente virus e batteri, si muovono nell'aria utilizzando particelle di aerosol di dimensioni maggiori: tale caratteristica consente anche a dei normali filtri per il condizionamento, dotati di un'efficienza sufficientemente elevata, di trattenerne una frazione considerevole. Va inoltre sottolineato che per tali filtri l'efficienza di cattura decresce con il diminuire delle dimensioni dell'aerosol ma torna a salire al raggiungimento della dimensione caratteristica della particella con massima penetrazione.

L'importanza di un adeguato sistema di filtrazione, inoltre, non deve essere considerata solamente in funzione di eventuali periodi di emergenza sanitaria, ma rappresenta una barriera difensiva costante anche nei confronti del particolato biologicamente inerte (e.g., PM10, PM2.5, PM1) che, penetrando all'interno del nostro apparato respiratorio tanto più profondamente quanto minore è la dimensione delle particelle (frazioni nanometriche), può raggiungere il sistema circolatorio passando attraverso gli alveoli polmonari e rendendosi responsabile di diverse patologie croniche, gravi e spesso incurabili. La riduzione della quantità di contaminante presente all'interno di un ambiente chiuso può avvenire applicando diversi metodi di controllo. S'immagini che l'ambiente interno sia costituito da un locale chiuso in cui vi sia una fonte di emissione di contaminante. I metodi per il controllo della quantità del contaminante all'interno di questo ambiente prevedono: il confinamento della fonte all'interno di un volume dedicato, la diluizione mediante immissione di aria esterna pulita, la diluizione mediante aria interna filtrata e l'estrazione localizzata. Escludendo dalla presente trattazione l'aria esterna e l'estrazione localizzata si vuole focalizzare l'attenzione sul concetto di filtrazione che rappresenta la rimozione parziale o totale dei contaminanti presenti nell'aria che attraversa il dispositivo filtrante. In maniera molto semplicistica possiamo schematizzare il contaminante o particolato solido, come sfere trascinate dal flusso d'aria, mentre il filtro costituito di materiale fibroso, come un cilindro di lunghezza infinita. Da questa semplificazione si può desumere che l'adesione delle particelle alle fibre è funzione delle condizioni di moto delle stesse e delle caratteristiche di adesione delle superfici a contatto; da questa valutazione nasce il termine "filtrazione meccanica". Nella realtà il filtro è costituito da materassini o carte filtranti molto porose che sono prevalentemente composte da una serie di strati di fibre sovrapposte che creano una specie di labirinto in grado di trattenere una certa quantità del particolato presente nell'aria. L'efficienza di filtrazione dipende da numerosi fattori: la distribuzione dimensionale dell'aerosol atmosferico, le caratteristiche geometriche delle fibre che compongono i materiali filtranti, la loro densità e la velocità con cui l'aria attraversa il filtro.

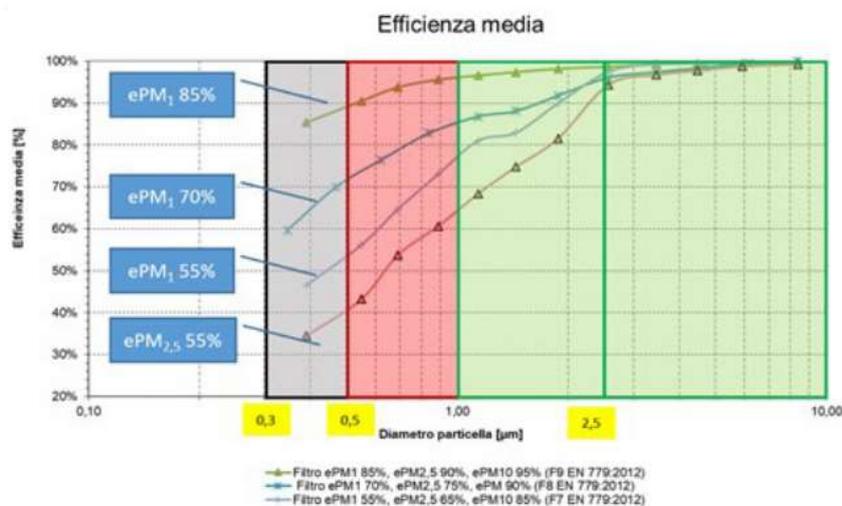
I diversi fenomeni di filtrazione, lavorando in sinergia, concorrono a definire l'efficienza globale di filtrazione di un particolare elemento filtrante, la quale avrà un valore minimo in corrispondenza di una particolare dimensione dell'aerosol, definita come particella con la massima penetrazione o MPPS (Most Penetrating Particle Size). Le caratteristiche fisiche e costruttive del medium e la geometria dell'elemento filtrante concorrono a definire l'efficienza nei confronti delle diverse granulometrie di aerosol e, come conseguenza, anche la resistenza al moto dell'aria che lo attraversa. Il materiale filtrante viene solitamente pieghettato e inserito all'interno di telai. Gli elementi filtranti possono essere configurati a pannello, a tasche morbide o rigide. Sono inseriti all'interno di macchine di condizionamento o depuratori d'aria. Solitamente sono messi in serie affinché il filtro pensato per accumulare il particolato più grossolano preservi il successivo pensato per captare il particolato fine. Esiste un ulteriore principio in grado di trattenere il particolato, basato su effetti elettrostatici indotti dal filtro stesso; tale principio viene impiegato nei filtri elettrostatici attivi a piastre (Fig. 4) alimentati elettricamente. In questo caso il particolato presente nell'aria che attraversa il filtro, passa in una prima zona di ionizzazione dove viene caricato elettrostaticamente; successivamente passa attraverso due piastre parallele e dotate di carica elettrica di segno opposto, che attraggono e trattengono il particolato ionizzato. L'efficienza di questo tipo di filtri dipende dalle dimensioni delle particelle, dalla differenza di potenziale che si ottiene dopo la loro ionizzazione con le piastre del secondo stadio del filtro e dalla velocità di attraversamento.



(Fig. 4) Principio funzionamento filtro elettrostatico a piastre

### Filtro per la rimozione del COVID-19

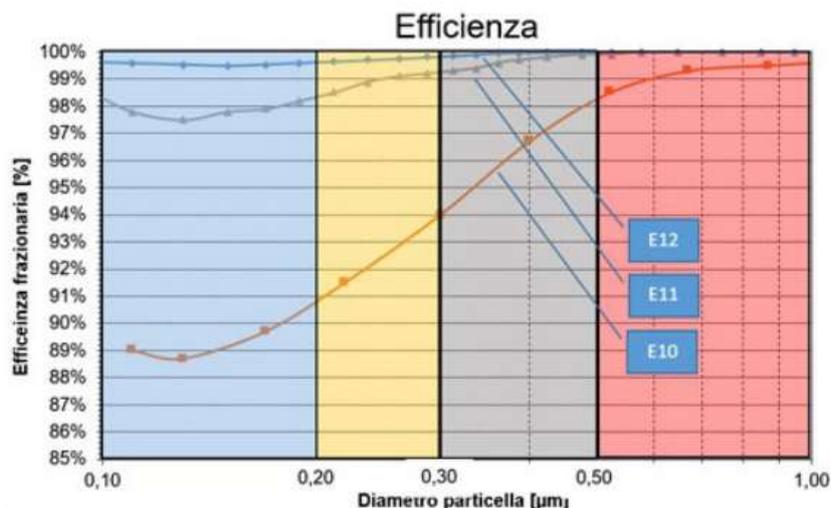
I virus hanno dimensioni variabili fra 0,005 e 0,1  $\mu\text{m}$  e di frequente si trovano riuniti in particelle di dimensioni maggiori legate ad altri nuclei di particolato. Indipendentemente dalla viabilità dell'aerosol i filtri trattengono il particolato in funzione delle caratteristiche fluidodinamiche e dimensionali degli elementi in gioco. Per cui per valutare l'idoneità degli elementi filtranti nel rimuovere i patogeni aerosospesi è necessario valutare la curva di efficienza del filtro in funzione del diametro delle particelle (Fig. 5). Come abbiamo visto i filtri impiegati nella ventilazione generale, per poter essere classificati, sono testati per la misura di efficienza attraverso l'impiego di aerosol sintetico compreso tra 0,3 e 10  $\mu\text{m}$ . I dati delle prove sono riassunti nei relativi test report che presentano in forma grafica anche la curva di efficienza. Con buona approssimazione, questa curva può essere impiegata per stimare l'effetto dei filtri nella riduzione del contaminante aerosospeso presente nell'aria trattata dall'impianto HVAC.



(Fig. 5) Curve di efficienza

In (Fig. 5) sono rappresentate quattro curve di efficienza misurate in accordo alla UNI EN ISO 16890-1:2017. Si può osservare come siano ben evidenti le differenti capacità di captazione del particolato con dimensioni inferiori a 2,5  $\mu\text{m}$ .

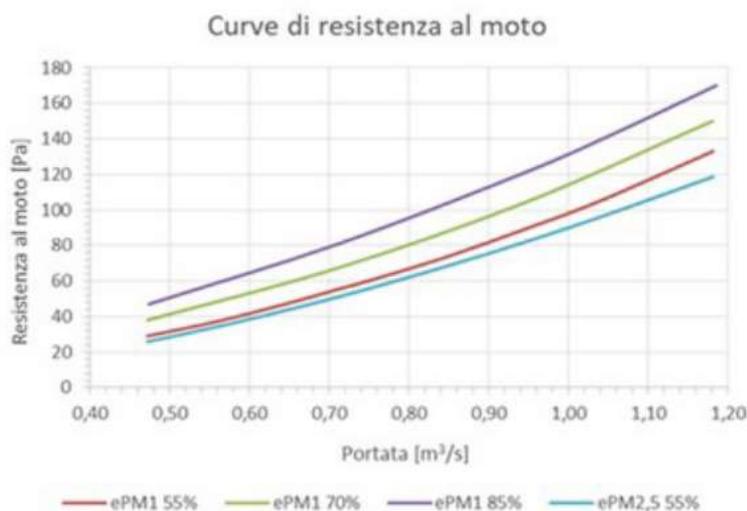
L'impiego di filtri in grado di rimuovere la componente più fine dell'aerosol (0,3-0,5  $\mu\text{m}$ ) consente di ridurre la contaminazione negli ambienti confinati occupati, soprattutto nel caso in cui sia presente una parte di aria di ricircolo. L'effetto di rimozione del particolato è ancora più evidente quando si osservano le curve di efficienza di filtri EPA e HEPA classificati secondo la UNI EN 1822-1:2019. In (Fig. 6) sono invece rappresentate tre curve di filtri EPA. Dalle curve di questi ultimi filtri si vede che al raggiungimento del valore minimo di efficienza per la particella caratterizzata dalla massima penetrazione, il valore di efficienza tende a salire sia per granulometrie dell'aerosol di test maggiori della MPPS, ma anche per dimensioni inferiori di quest'ultima.



(Fig. 6) Efficienza filtri EPA e HEPA

Questo fenomeno si verifica anche per le classi di efficienza inferiori ISO ePM<sub>x</sub>, anche se i valori di efficienza per aerosol di dimensione inferiore a 0.3 mm non vengono considerati ai fini della classificazione. L'impiego di filtri più efficienti per il trattamento di aria di ricircolo sicuramente migliora le condizioni di qualità dell'aria e quindi riduce il ricircolo di contaminante generato nell'ambiente, bisogna però considerare l'incremento di perdita di carico.

Nella (Fig. 7) sono mostrate delle curve di perdita di carico esemplificative di filtri ePMx. In parallelo alla scelta di un filtro più efficiente e che presenta una perdita di carico iniziale più elevata è necessario valutare la prevalenza residua utile del sistema di ventilazione per garantire la quantità di aria necessaria per la ventilazione e climatizzazione dell'ambiente.



(Fig. 7) Perdite di carico nei filtri ePM.

La riduzione del rischio di contaminazione può essere legata all'installazione di filtri più efficienti che trattano l'aria di ricircolo. Tali analisi si devono legare a delle valutazioni costi-benefici in cui si possano confrontare soluzioni impiantistiche che prevedono l'impiego di filtri più prestazionali nell'aria di ricircolo e secondaria o l'impiego di aria esterna. Tutto ciò al fine di garantire il quantitativo di aria pulita ottimale a ridurre il rischio di contagio.

## 2.4. Ionizzazione Bipolare

Un altro sistema di riduzione della trasmissione da virus è la ionizzazione bipolare, che è stata già introdotta nei filtri elettrostatici. È basato su un processo, in cui gli elettrodi ad alta tensione creano una tempesta di ioni positivi e negativi dalle molecole nell'aria, come l'ossigeno e l'acqua. Gli ioni di questi sistemi sarebbero in grado di agganciarsi alle particelle virali e spingerle verso il suolo (dove diventerebbero praticamente innocue), oppure di reagire con le proteine virali e di impedire al SARS-CoV-2 di replicarsi.

Si tratta di una tecnologia emergente, che seppur potenzialmente efficace al momento non è ancora supportata da studi convincenti e sottoposti a revisione paritaria. Insomma, saranno necessarie ulteriori indagini per determinare se gli ioni siano effettivamente capaci di neutralizzare (o almeno rendere innocuo) il coronavirus SARS-CoV-2.

## ***CAPITOLO 3. Fattori ambientali che influenzano la trasmissione***

Come visto nei capitoli precedenti, è possibile che piccole particelle virali possano entrare negli ambienti interni dalle varie fonti di emissione aiutate da fattori ambientali quali umidità relativa, velocità del vento, temperatura rappresentando così la trasmissione da aerosol.

### ***3.1. Umidità relativa***

L'umidità influisce sia sulla cinematica dell'evaporazione che sulla crescita delle particelle. In luoghi interni asciutti, cioè con meno umidità (< 40% UR) rispetto allo standard del 50%, le possibilità di trasmissione aerea di SARS-CoV-2 sono superiori a quelle dei luoghi umidi (cioè > 90% UR). Sulla base di studi precedenti, un'umidità relativa del 40-60% è risultata ottimale per la salute umana in ambienti chiusi. Pertanto, è estremamente importante stabilire uno standard minimo di umidità relativa per ambienti interni come ospedali, uffici e trasporti pubblici per ridurre al minimo la diffusione aerea di SARS-CoV-2. Per questo, una comprensione precisa dell'influenza dell'umidità sulla trasmissibilità di COVID-19 negli ambienti interni è importante per la consapevolezza del pubblico in generale. Per le aree interne con scarsa ventilazione, le persone inalano l'aria di ricircolo. Nei climi freddi e temperati, all'interno di un ambiente indoor, i valori di UR sono tipicamente bassi. A causa della bassa UR, le goccioline evaporano a una velocità più rapida formando particelle di dimensioni più piccole [39]. Come già spiegato, le dimensioni più piccole potrebbero portare a un tempo di sospensione più alto delle goccioline virali e, in definitiva, potrebbero essere trasportate a distanze maggiori a seconda delle condizioni di ventilazione. Ma, in luoghi umidi, all'aumentare dell'umidità, la dimensione delle goccioline virali aumenta in modo tale da aumentare la velocità di caduta delle stesse, offrendo meno possibilità alle altre persone di respirare le goccioline virali infettive. Il ruolo dell'umidità sembra essere estremamente importante per la diffusione aerea di COVID-19 negli ambienti interni.

### ***3.1.1. Ruolo dell'umidità relativa nella trasmissione***

Quando le goccioline espirate escono da una persona infetta, inizieranno a evaporare o si verificherà una crescita di goccioline. Entrambi questi scenari dipendono dall'umidità relativa. In condizioni interne asciutte, quando le goccioline di aerosol contenenti virus e altri fluidi vengono espulse nell'aria, evaporano in modo che la pressione del vapore acqueo sulla superficie dell'aerosol si equilibri con le condizioni ambientali. La conseguente perdita di acqua provoca cambiamenti nella concentrazione di soluti come proteine, sali o cambiamenti in altre proprietà come il pH [40]. Dopo l'evaporazione dell'acqua, le micro-goccioline diventeranno piuttosto piccole e sospese nell'aria per periodi più lunghi. Dopo qualche tempo, la concentrazione di particelle virali sospese aumenterà a seconda dell'aria stagnante e delle strutture di scarsa ventilazione, aumentando così il rischio di infezione in luoghi pubblici come ospedali, ristoranti.

Si è scoperto che ci sono tre diversi scenari in cui l'UR influenza la trasmissione del virus nell'ambiente interno:

- il destino dei microrganismi all'interno delle goccioline virali;
- la sopravvivenza o l'inattivazione del virus sulle superfici;
- il ruolo dell'aria secca interna nella trasmissione aerea di virus.

#### ***Destino dei microrganismi all'interno delle goccioline virali***

La trasmissione di malattie altamente infettive come il COVID-19 richiede che gli agenti patogeni rimangano attivi al di fuori del corpo ospite. L'UR influisce sulla sopravvivenza di alcuni di questi microrganismi nell'ambiente. Uno studio recente ha spiegato che i virus sono sopravvissuti bene a valori inferiori al 33% e per valori pari al 100%, mentre nei valori intermedi la vitalità è stata notevolmente ridotta [41]. Si è andato a studiare l'effetto dell'UR sulla vitalità dei virus sia negli aerosol sospesi che nelle goccioline. Sulla base dei risultati, la vitalità del virus è in genere molto più bassa con un'umidità relativa di circa il 60% (~55%).

Questo perché la cinetica di evaporazione gioca un ruolo importante nel modulare la sopravvivenza del microrganismo all'interno delle goccioline o degli aerosol. Si può affermare che UR controlla la cinetica di evaporazione delle goccioline. Il fattore di arricchimento (cioè la concentrazione calcolata del soluto data una certa quantità di perdita d'acqua o l'aumento della concentrazione dei soluti, quando le goccioline evaporano) è un parametro importante mentre spiega il processo cinetico di evaporazione. A UR più bassa, cioè al 43% e meno, si è scoperto che il fattore di arricchimento potrebbe aumentare rapidamente con l'evaporazione delle goccioline e asciugarsi completamente, mentre a UR più alta, l'evaporazione avveniva più lentamente portando ad un graduale aumento del fattore d'arricchimento; così facendo la goccia non si secca mai. Lin e Marr [41] hanno caratterizzato l'impatto di questa evaporazione con concentrazioni di soluti dannose per la vitalità del virus (ad es. Sali) calcolando la loro dose cumulativa, o la somma dei prodotti della concentrazione di soluti e del tempo. A UR più bassa, a causa della rapida evaporazione, le concentrazioni di soluto sono aumentate ma poi sono diventate irrilevanti dopo che le goccioline si sono asciugate, consentendo alla vitalità del virus di rimanere elevata. Ai massimi livelli di UR, la dose cumulativa aumentava lentamente e non aveva un grande impatto sulla vitalità del virus, mentre a UR intermedia, la dose cumulativa era un fattore cruciale per ridurre la vitalità del virus poiché le concentrazioni di soluto aumentavano significativamente mentre la gocciolina non evaporava mai completamente. Pertanto, l'inattivazione del virus all'interno di goccioline o aerosol è legata alla dose cumulativa di una sostanza nociva in soluzione, che a sua volta ha una risposta non lineare all'UR.

### **Sopravvivenza o inattivazione del virus sulle superfici**

Un rapporto basato sul ruolo dell'umidità, sulla sopravvivenza e l'inattivazione del virus sulle superfici ha mostrato che l'alta temperatura ad alta umidità relativa ha un impatto collegiale sull'inattivazione della vitalità di SARS-CoV-1 [42]. Si deve considerare che, temperature più basse e bassa umidità supportano la sopravvivenza prolungata del virus su superfici contaminate.

Un altro punto importante da menzionare qui è che la trasmissione del virus si è spesso verificata in ambienti ben climatizzati come ospedali o hotel in alcuni paesi che hanno un uso intensivo dell'aria condizionata.

### **Il ruolo dell'aria secca interna nella trasmissione aerea dei virus**

C'è un contributo significativo dell'aria secca interna sia nella trasmissione di malattie dei residenti. Durante i freddi inverni, l'aria esterna viene aspirata all'interno e quindi riscaldata a un livello di temperatura confortevole. Questo processo ridurrà significativamente l'umidità relativa all'interno, il che crea una situazione estremamente pericolosa per i residenti al chiuso, in particolare durante la pandemia di COVID-19. Quando l'umidità relativa all'interno è inferiore al 40%, l'uomo diventa più vulnerabile alle infezioni respiratorie virali, rendendo il virus SARS-CoV-2 più infettivo nell'aria inalata. Studi precedenti hanno dimostrato che per la salute umana, un'umidità relativa tra il 40 e il 60% è ottimale [43]. Quando l'umidità relativa all'interno è inferiore al 40 %, l'aria priva di umidità risultante fornisce un percorso ottimale per la trasmissione a lunga distanza di piccoli aerosol infettivi. Queste particelle virali nell'aria viaggeranno ulteriormente, verranno inalate da altri residenti o infine si depositeranno su superfici dove possono sopravvivere per molti giorni. L'infettività di molti virus, incluso SARS-CoV-2, è effettivamente aumentata a causa dei bassi livelli di umidità relativa. L'aria secca ha anche un impatto significativo sulla nostra immunità respiratoria. Durante l'inalazione di aria a bassa umidità relativa, il muco nel naso e nella gola diventa secco e più viscoso, il che riduce la capacità delle ciglia di espellere gli aerosol virali. La bassa UR compromette la capacità del sistema immunitario di rispondere efficacemente ai microrganismi [44]. Le aree dell'orecchio umano, del naso e della gola sono più efficaci come combattenti del virus ad alti valori di umidità relativa piuttosto di quando l'aria della stanza è molto secca. Mentre il distanziamento sociale riduce il rischio di contrarre COVID-19 da altri abitanti attraverso la contaminazione a corto raggio e quindi da grandi goccioline, fa meno per prevenire la trasmissione di minuscoli aerosol infettivi nell'aria in quanto restano per più tempo sospesi e possono raggiungere distanze ben superiori ai sei piedi di distanziamento imposti.

### ***3.1.2. Confronto del rapporto UR esterna con UR interna***

Un ambiente interno è un microambiente in cui le persone trascorrono la maggior parte della propria vita quotidiana. Di conseguenza, l'aria interna contribuisce all'esposizione della popolazione più di quella esterna, anche se ovviamente è influenzata da fattori presenti sia all'interno che all'esterno. In luoghi interni asciutti, ovvero con poca umidità (< 40%), le possibilità di trasmissione aerea di COVID-19 sono elevate.

Sulla base di un esperimento indoor nelle città cinesi nel periodo gennaio-marzo 2020, la diffusione aerea di SARS-CoV-2 è stata ridotta aumentando l'UR dal 23,33% all'82,67% [45]. In un altro studio [39] hanno recentemente studiato l'influenza dell'UR utilizzando la modellazione numerica. Nello studio, hanno considerato il 40% di umidità relativa come limite inferiore e il 95% di umidità relativa come limite superiore. Hanno scoperto che il 40% di umidità relativa, attiva l'evaporazione dell'acqua nelle goccioline della tosse, portando al restringimento delle goccioline e alla sospensione prolungata nell'aria; mentre un'elevata umidità relativa al 95% aumenterà la dimensione delle goccioline a causa della crescita igroscopica con frazioni di deposizione più elevate sia sull'uomo che sul terreno.

Quando si considera l'umidità dell'aria ambiente, è stato riscontrato un ruolo importante dell'umidità nella rapida trasmissione di COVID-19 all'interno della città di New York [46]. Studio simile è stato svolto a Singapore [47], dove hanno trovato la correlazione positiva dell'umidità assoluta (UA) con la diffusione del COVID-19 sulla base dei dati giornalieri forniti dal Ministero della Salute, questo perché, in ambienti esterni più umidi, è più probabile che la popolazione utilizzi aria interna più secca e quindi promuova una maggiore vitalità del COVID. Considerando il fattore di umidità assoluta esterna durante gli inverni freddi, è stato riscontrato che il 73% dei casi confermati, nella regione dello studio, aveva un'umidità assoluta nell'intervallo 3-10 [g\*m<sup>3</sup>][48]. Quando la temperatura esterna è bassa e l'ambiente interno è riscaldato, l'umidità relativa dell'aria interna è strettamente correlata all'umidità dell'aria esterna, con conseguente aumento dei casi di COVID-19.

L'UR può essere considerata come un fattore estrinseco nella stabilità del virus perché controlla l'evaporazione, che influenza le dimensioni e il destino fisico di una gocciolina e il suo microambiente chimico. Al contrario, non c'è nessun meccanismo attraverso il quale ci si aspetta che l'UA influenzi il diametro delle goccioline se non per la sua relazione con UR.

A questo punto è fondamentale spiegare la relazione tra UR e UA. UA è una concentrazione di massa che descrive la quantità di vapore acqueo per volume d'aria. L'aria contiene vapore acqueo a concentrazioni che vanno da quasi zero grammi di vapore acqueo per metro cubo di aria nei deserti più aridi a circa 40 [g\*m<sup>3</sup>] in ambienti caldi e umidi. La quantità di vapore acqueo nell'aria può anche essere espressa come pressione parziale in unità come atmosfere o millibar. Un concetto correlato è l'umidità specifica, che è la massa di vapore acqueo per massa d'aria, in modo tale che l'umidità assoluta e specifica siano correlate dalla densità dell'aria. UR è definita come il rapporto tra la pressione (o concentrazione) del vapore acqueo effettiva e la pressione (o concentrazione) del vapore acqueo di saturazione, definita come la pressione parziale di equilibrio del vapore acqueo sopra una superficie piana. La pressione del vapore di saturazione aumenta con la temperatura quindi la concentrazione di vapore acqueo può essere maggiore nell'aria più calda. La relazione tra AH e RH dipende dalla temperatura.

### ***3.2. Velocità dell'aria***

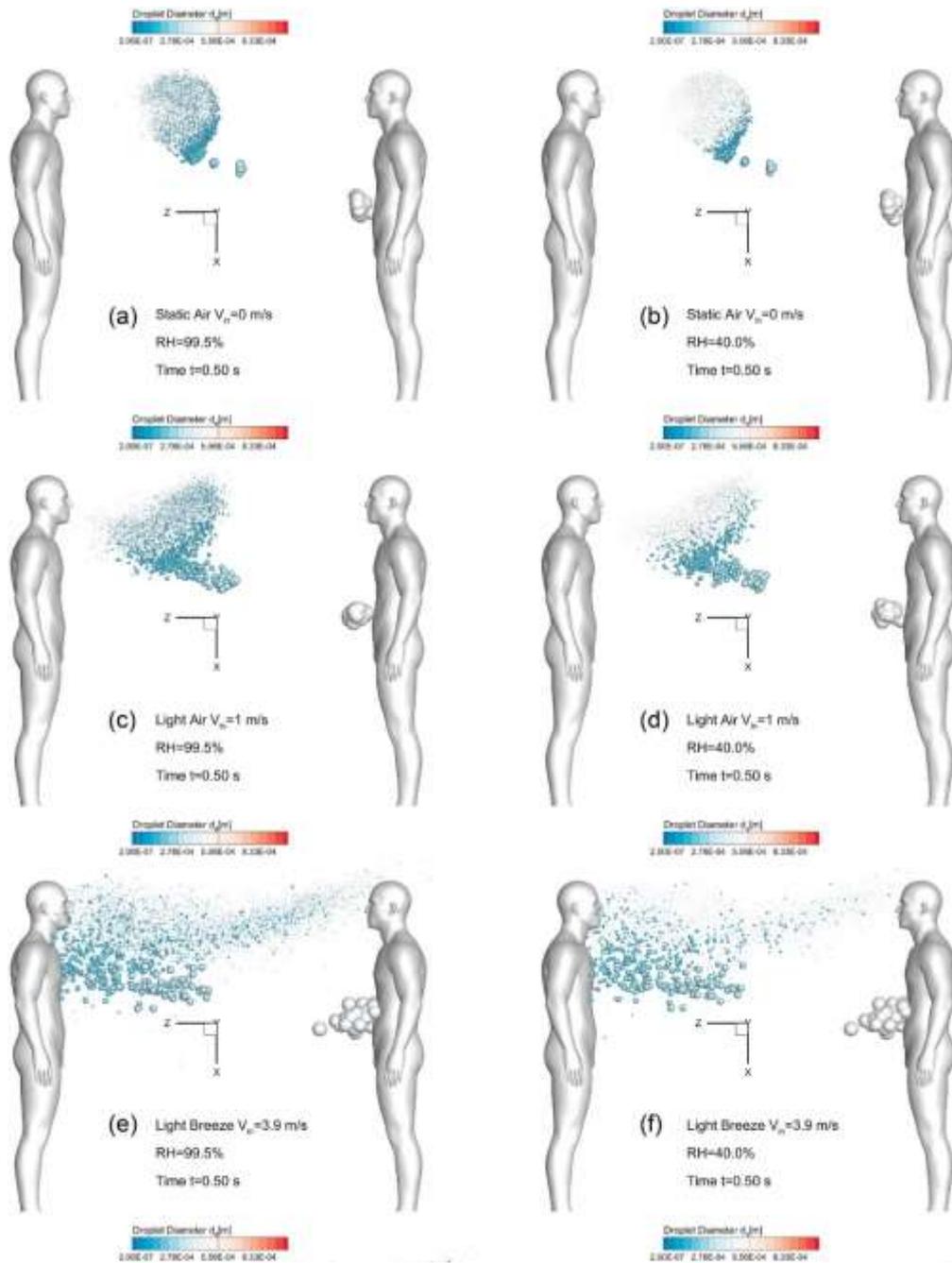
Per rallentare la diffusione di COVID-19 tramite trasmissione aerea, a partire da maggio 2020 si raccomanda una politica di "distanziamento sociale" di circa 1,83 m (6 piedi). Tuttavia, questa distanza sociale è definita con aria ambiente statica che non è realistica. L'attuale politica di distanziamento sociale trascura anche l'effetto dell'umidità relativa. Inoltre, si presume spesso che la maggior parte delle goccioline respiratorie cada e raggiunga il pavimento entro tale distanza dalla fonte di emissione. Tuttavia, le micro-goccioline possono essere significativamente influenzate dalla convezione del flusso d'aria ambiente e dal trasporto molto più lontano di 1,83 m.

Un tale effetto sconosciuto può aumentare la complessità della definizione delle politiche di allontanamento sociale e può comportare potenziali rischi per le persone in contatto con il SARS-CoV-2 aereo. Pertanto, è necessario indagare sistematicamente come il vento ambientale e quindi la velocità d'immissione di un impianto di VMC possono influenzare la trasmissione aerea delle goccioline cariche di SARS-CoV-2 generate dalla tosse da un paziente positivo al COVID-19 a un soggetto umano sano che si trova a una distanza superiore a 1,83 m. Tale affermazione è fondamentale anche ai fini della sensibilizzazione della popolazione.

Supportati dagli studi inerenti alla condensazione e all'evaporazione delle goccioline [41] si sono sviluppati diversi studi numerici per caratterizzare le nuvole di aerosol per la tosse o per simulare fenomeni di trasporto di aerosol in ambienti sia interni che esterni. Tuttavia, la maggior parte degli studi numerici, utilizzando modelli basati su Euler-Euler o Euler-Lagrange, trascurano la condensazione e l'evaporazione delle goccioline della tosse; il che può limitare la validità delle previsioni sulla traiettoria delle goccioline.

Si afferma che la temperatura interna e l'UR hanno un effetto trascurabile sulla dispersione delle goccioline di saliva con diametri iniziali da 0,1 a 200  $\mu\text{m}$  in un ambiente interno con condizioni di ventilazione specifiche [49].

I diametri iniziali delle goccioline vanno da 2 a 2000  $\mu\text{m}$  e le velocità del vento vanno da 0 a 16 km/h, rappresentando diverse scale del vento Beaufort dall'aria calma alla brezza moderata. Le due UR ambientali impiegate in questo studio sono 40% e 99,5%. Lo stesso studio [39] che si è occupato di come l'umidità relativa influisca nella trasmissione del virus, tratta anche di come la velocità dell'aria può incidere sulla trasmissione o meno tra due soggetti in posizione statica dopo un colpo di tosse da parte di uno dei due. I risultati dicono che con velocità da 0 a 5,5 m/s, la convezione, dovuta al vento ambientale diventa più dominante sulle piccole gocce. Le gocce più grandi non sono influenzate da una velocità inferiore a 5,5 m/s. Tale osservazione indica che l'inerzia e la sedimentazione gravitazionale sono dominanti per quelle grandi goccioline. In particolare, le grandi goccioline di colore grigio hanno viaggiato tutte per circa 1,83 m a  $t = 0,5$  s (*Fig. 8*).

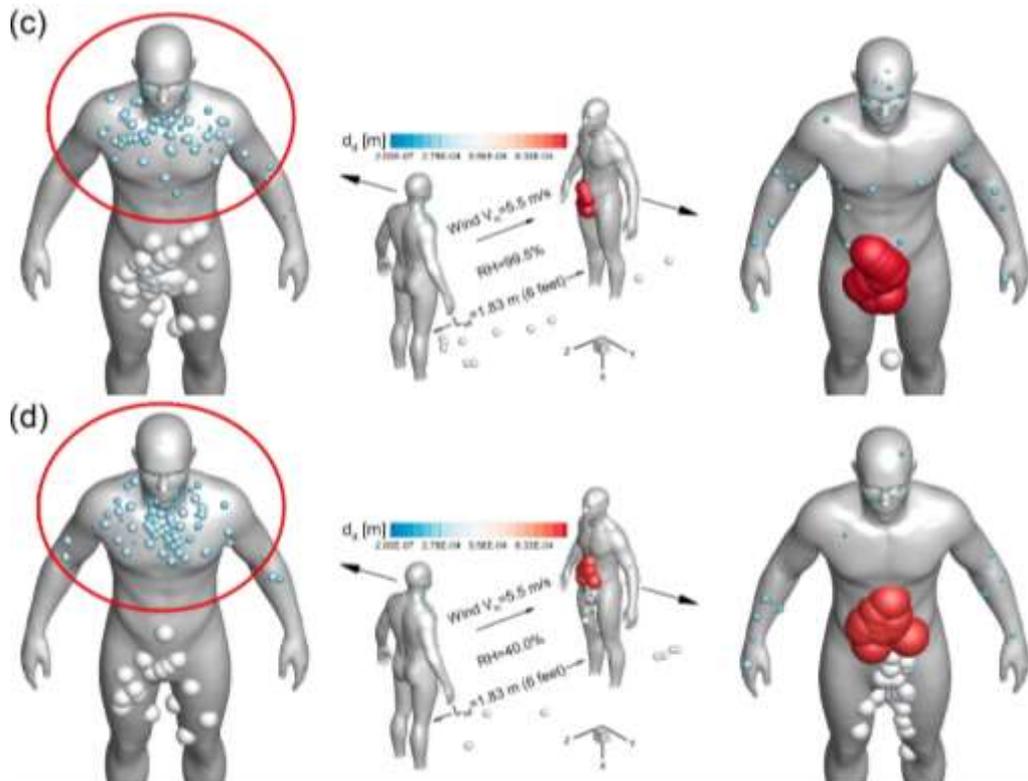


(Fig. 8) Velocità del vento  $<5.5$  m/s ed effetti sui modelli di trasmissione delle gocce a  $t = 0,5$  s

Nelle sperimentazioni si è inserita anche l'umidità relativa annessa alla velocità dell'aria. Dalla figura si nota che le dimensioni delle gocce nei casi con UR=99.5 % sono maggiori dei casi con UR = 40%.

Questo perché l'elevata UR (99,5%) esalta le crescite igroscopiche delle goccioline, mentre la bassa UR (40%) porta al ritiro delle gocce a causa dell'evaporazione.

Con una maggiore intensità della turbolenza localizzata e lo slancio del flusso d'aria nelle zone di ricircolo, tra i due soggetti, accade che le goccioline più grandi vengono influenzate e spostate indietro. Infatti, con un'elevata velocità dell'aria, le velocità del flusso d'aria locale nella zona di ricircolo hanno un'ampiezza di velocità e un'intensità di turbolenza maggiori. Pertanto, l'effetto convezione è più dominante in modo che possa influenzare le gocce più grandi e vincere la loro inerzia, costringendole a seguire il flusso di ricircolo all'indietro (Fig. 9).



(Fig. 9) Effetto del ricircolo

Tali traiettorie hanno portato ai modelli di deposizione delle goccioline di colore grigio mostrate in (Fig. 9). Inoltre, anche qui è evidente l'effetto dell'UR sulla dinamica del cambiamento della dimensione delle gocce.

I confronti delle dinamiche di trasporto delle goccioline mostrate nelle figure possono fornire informazioni sull'influenza del vento e dell'UR sulla trasmissione aerea di goccioline cariche di SARS-CoV-2. Si può osservare che le goccioline grandi si muovono più velocemente e rimangono più concentrate delle goccioline piccole. Questo perché le goccioline di grandi dimensioni hanno un numero di Stokes relativamente alto, il che indica l'effetto meno dominante delle forze di dissipazione viscosa che agiscono su di esse. Pertanto, sono più "capaci" di mantenere i loro slanci iniziali. Al contrario, con il maggiore rapporto tra superficie e volume, le piccole goccioline perdono il loro momento iniziale e l'energia cinetica più rapidamente a causa dell'effetto di dissipazione viscosa. Esse si disperdono molto velocemente nell'aria a differenza delle gocce più grandi.

Ciò ci dimostra che con l'attuale politica di distanza sociale di 1,83 m, le micro-goccioline possono ancora essere trasportate nella regione della testa dell'uomo virtuale sano in piedi sulla destra. Pertanto, l'attuale politica di distanziamento sociale potrebbe non essere sicura al 100% anche per le condizioni ideali dell'aria statica. Detto questo, anche la velocità dell'aria renderà le dinamiche di trasporto delle piccole goccioline più complesse e può potenzialmente fornire loro maggiore energia cinetica e farle viaggiare più lontano nell'aria.

- $V > 0.25 \text{ m/s}$  interazione con i droplet;
- $V > 2.00 \text{ m/s}$  trascinamento aerosol.

### ***3.3. Temperatura dell'aria***

Secondo il rapporto dell'Istituto Superiore di Sanità, per quanto riguarda il mantenimento della temperatura nelle attività di ristorazione, "il Sars-Cov2 mantiene un comportamento analogo a quello di altri Coronavirus come Sars e Mers, non essendo possibile rilevare virus infettante dopo 30 minuti a  $56^{\circ}\text{C}$  e dopo 5 minuti a  $70^{\circ}\text{C}$ ". Ci sono studi sviluppati su Mers-CoV inerenti alla presenza dello stesso nell'aria a diverse temperature. Nel 2012, in Medio Oriente è emerso un nuovo coronavirus chiamato coronavirus della sindrome respiratoria del Medio Oriente (MERS-CoV).

È stata osservata una trasmissione limitata da uomo a uomo di MERS-CoV [50] e attualmente non sono disponibili dati sulle modalità di trasmissione. La presenza di MERS-CoV come patogeno respiratorio e l'elevata carica virale rilevata nei campioni del tratto respiratorio inferiore di pazienti infetti, suggerisce che il MERS-CoV sarà prevalentemente espulso durante la tosse. Per il virus dell'influenza A è dimostrato che la trasmissione è legata alla vitalità del virus in diverse condizioni ambientali, come la temperatura e l'umidità per un ambiente fresco e secco, che è il più favorevole per la trasmissione, mentre le condizioni calde o umide sono le più sfavorevoli [51]. In questo studio la stabilità di MERS-CoV è stata valutata in tre diverse condizioni ambientali:

- alta temperatura e bassa umidità, 30°C – 30% UR;
- alta temperatura e alta umidità, 30°C – 80% UR;
- bassa temperatura e bassa umidità, 20°C – 40% UR.

La stabilità di MERS-CoV nelle tre condizioni ambientali testate è stata rispettivamente confrontata con quella del virus dell'influenza A A/Mexico/4108/2009 (H1N1) originato da un isolato umano ottenuto durante la pandemia di influenza A(H1N1) 2009. Per determinare la stabilità ambientale dei due virus, sono state isolate le loro goccioline da 5 µl e poste su una superficie di acciaio e una in plastica per poi essere incubate alle condizioni desiderate in una camera ambientale (Caron, USA) per 10 e 30 minuti e 4, 8, 24, 48 e 72 ore. Gli esperimenti sono stati condotti in triplicato. Sia per il virus MERS-CoV che per il virus A/Mexico/4108/2009 (H1N1), non è stata osservata alcuna differenza di stabilità tra le 2 superfici. Il virus MERS-CoV poteva ancora essere recuperato dopo 48 ore alla condizione di 20°C - 40% UR, mentre per le altre due condizioni il virus è rimasto vitale per otto (30°C - 80% UR) e 24 ore (30°C – 30% UR) rispettivamente. Si è deciso anche di andare a studiare il loro comportamento in situazioni di aerosol. Per studiare la loro rispettiva stabilità dell'aerosol, i virus MERS-CoV e A/Mexico/4108/2009 (H1N1) sono stati aerosolizzati a:

- 20°C con 40% o 70% UR.

Gli esperimenti sugli aerosol sono stati eseguiti utilizzando la piattaforma di gestione dell'aerosol dove sono state aerosolizzate in triplicato per dieci minuti. MERS-CoV è diminuito solo del 7% in vitalità al 40% RH, mentre la vitalità al 70% di umidità relativa è diminuita significativamente con l'89%. La vitalità del virus A/Mexico/4108/2009 (H1N1) è diminuita in entrambe le condizioni con rispettivamente il 95% per il 40% di umidità relativa e il 62% per il 70% di umidità relativa. Questa diminuzione è risultata significativa al 40% di UR.

In questo studio si è dimostrato innanzitutto che rispetto al virus A/Mexico/4108/2009 (H1N1), MERS-CoV rimane vitale per una durata più lunga nell'ambiente. Dopo quattro ore, non è stato rilevato alcun virus vitale A/Mexico/4108/2009 (H1N1) rispetto a 8, 24 o 48 ore per MERS-CoV a seconda delle condizioni ambientali. MERS-CoV era molto stabile in forma di aerosol a 20°C - 40% RH. Poi è stato riportato che il coronavirus della sindrome respiratoria acuta grave SARS-CoV rimane vitale per un massimo di cinque giorni a 22-25 ° C e dal 40 al 50% di UR e l'aumento di temperatura e umidità ha comportato una rapida perdita di vitalità [52]. Sebbene un confronto tra diversi studi sperimentali dovrebbe essere affrontato con cautela, la relativa stabilità di MERS-CoV a 20°C – 40% di umidità relativa e la rapida diminuzione della vitalità del virus a temperature più elevate e umidità più elevata suggerisce che MERS-CoV e SARS-CoV condividano caratteristiche di stabilità relativamente simili. La capacità di MERS-CoV di rimanere vitale in uno stato aereo suggerisce il potenziale per MERS-CoV di acquisire la capacità di essere trasmesso tramite aerosol. Come detto in precedenza il Sars-CoV2 ha un comportamento analogo e grazie a questo studio svolto nel 2011 possiamo affermare che la temperatura, insieme alla velocità dell'aria e all'umidità relativa, incide sulla trasmissione del virus, soprattutto in forma di aerosol.

### ***3.4. Portata d'aria***

L'umidità relativa, la velocità dell'aria e la temperatura variano, all'interno di un ambiente, se c'è una portata immessa nello stesso; se non c'è portata, il rischio aumenta. In sintesi, ciò che permette di diminuire il rischio è sicuramente la portata, che può essere naturale o meccanica.

Ci sono diverse normative che regolano e valutano le portate d'aria da immettere all'interno di un ambiente ai fini di migliorare la qualità dell'aria.

1. La normativa **Din1946-6** è una norma tecnica emanata dal Deutsches Institut für Normung tedesco. La normazione è tecnica e non di legge, significa che non vi è un obbligo di applicazione, di base sono normazione privata con carattere di raccomandazione. In base alla norma DIN 1946-6, per non superare il limite di 1000 ppm di CO<sub>2</sub>, si deve prevedere un flusso d'aria dall'esterno di **30 m<sup>3</sup>/h** per persona.
2. La norma **UNI 10339 – 95** (o 10339/1995 o 10339:1995), ha per oggetto: “Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine, la fornitura”.

Fissa le portate di aria esterna di rinnovo e di estrazione da adottare per diverse tipologie edilizie; prescrive i requisiti della filtrazione, fissa i valori di velocità dell'aria in ambiente, ma non prende in considerazione l'efficienza del sistema di distribuzione.

La portata d'aria esterna nominale deve essere calcolata in base alla seguente formula:

$$Q = n * q_p + V * q_s$$

**Q**: portata esterna nominale [m<sup>3</sup>/h];

**V**: volume del locale [m<sup>3</sup>];

**q<sub>p</sub>**: portata d'aria esterna minima per persona, tabulata per destinazione d'uso del locale [m<sup>3</sup>/(h·pp)];

**q<sub>s</sub>**: portata d'aria esterna minima per unità di superficie, tabulata per destinazione d'uso del locale [m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>)];

**n**: affollamento del locale [persone].

Per assicurare queste portate sicuramente ci deve essere una ventilazione meccanica controllata, soprattutto in locali pubblici, senza andare a creare delle situazioni di discomfort termoigrometrico.

### ***3.5. Comfort***

È giusto soffermarsi sul comfort termico perché può dare indicazioni anche sulla percentuale di rischio di trasmissione a seconda se ci troviamo in un ambiente molto caldo o molto freddo, essendo la temperatura, l'umidità relativa e la velocità tre dei parametri per il calcolo del PMV e del PPD. Il comfort igrometrico rappresenta la condizione mentale di soddisfazione relativa all'ambiente termico. La sensazione di benessere è diversa da individuo a individuo e dipende dall'età, dal sesso, dallo stato fisico e psichico, dal metabolismo, dal periodo della giornata, dagli usi e abitudini, dalla propria sensibilità, ecc. La temperatura interna del corpo umano è normalmente pari a 37 °C. Quando la temperatura cutanea supera i 37 °C i sensori del caldo, collocati nell'ipotalamo, attivano dei meccanismi per diminuire la temperatura (aumento del flusso sanguigno alla periferia e sudorazione). Nel caso invece la temperatura cutanea scenda sotto i 34 °C, i sensori del freddo, collocati sulla cute, innescano dei meccanismi per aumentare la temperatura (riduzione del flusso sanguigno e brividi). Se gli impulsi trasmessi dai due sensori sono della stessa ampiezza si prova la sensazione di neutralità termica, altrimenti si ha la sensazione di caldo o di freddo, che possiamo anche definire di "discomfort".

#### **Bilancio energetico del corpo umano**

Il corpo umano svolge la funzione di convertire l'energia chimica degli alimenti in altre forme energetiche. L'insieme di queste trasformazioni di tipo ossidativo, cioè esoenergetiche (liberano energia), è il metabolismo. Come per qualsiasi sistema termico, la temperatura del corpo umano è il risultato di bilanci di energia e di massa: il mantenimento della temperatura interna, in condizioni stazionarie, richiede che la potenza termica prodotta internamente dal metabolismo sia pari alla somma della potenza dissipata all'esterno attraverso i diversi meccanismi di scambio termico (conduzione, convezione e irraggiamento) e di massa (sudorazione, traspirazione, umidificazione dell'aria nei polmoni) e del lavoro muscolare sviluppato.

L'organismo umano deve poter mantenere costante a 37°C la propria temperatura interna, con una tolleranza inferiore a 1°C.

### Tasso metabolico e met

Il Tasso metabolico  $M$  è la potenza termica generata dalle reazioni metaboliche riferita all'unità di superficie del corpo ed è connesso al livello di attività fisica svolta dall'individuo. Il tasso metabolico  $M$  è espresso in unità SI con  $W/m^2$  oppure utilizzando l'unità tecnica di misura met ( $1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$ ). Ad esempio, una persona seduta, nelle condizioni di benessere ambientale, ha una dispersione termica data dal prodotto della superficie corporea ( $1.7 - 1.8 \text{ m}^2$ ) per 1 met, ovvero circa 100 W. Il valore della potenza metabolica aumenta all'aumentare dell'attività fisica praticata.

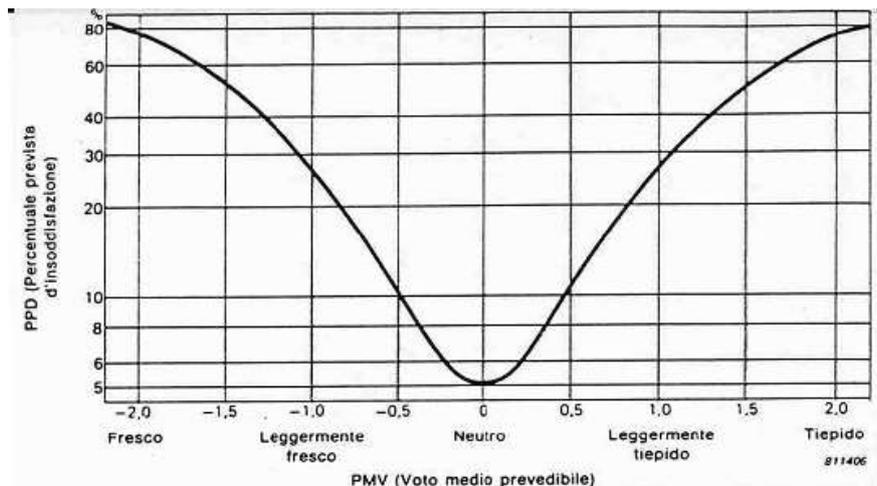
### Indici di Comfort Termico (PMV e PPD)

Gli indici PMV e PPD servono per predire la sensazione termica soggettiva dell'ambiente da parte di un gruppo di persone che vi soggiorna. L'indice di sensazione termica PMV (*Predicted Mean Vote* o *Voto Medio Previsto*) è un indice di valutazione dello stato di benessere di un individuo espresso utilizzando una scala psicofisica a sette valori (Fig. 26), dove lo ZERO rappresenta lo stato di benessere termico ed i valori estremi l'indice di sensazione di troppo freddo (-3) o troppo caldo (+3).

+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Abbastanza caldo
0	Accettabilità termica
-1	Abbastanza freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

(Fig. 26) Valori PMV.

Un altro indice per misurare il comfort termico è il PPD (*Percentage of Person Dissatisfied*), che esprime la percentuale di persone insoddisfatte che si trovano in un determinato ambiente, in relazione al voto di sensazione termica (PMV) il cui modulo sia pari o superiore a 2 (caldo, molto caldo, freddo, molto freddo).



(Fig. 27) Relazione tra PMV e PPD.

(Fig. 27) rappresenta graficamente la relazione ricavata sperimentalmente tra gli indici PMV e PPD. A  $PMV=0$  corrisponde un  $PPD=5\%$ ; in quanto le ricerche sperimentali hanno dimostrato che è impossibile realizzare un'unica condizione ambientale in grado di soddisfare tutte le persone che vi soggiornano. Ci sarà sempre un determinato numero di persone insoddisfatte. La norma UNI EN ISO 7730 raccomanda che il valore di PMV in un ambiente sia compreso nell'intervallo  $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$  con un  $PPD \leq 10\%$ . La norma UNI 10339 prevede invece un intervallo di accettabilità più ampio, ovvero  $-0.8 \leq PMV \leq +0.8$  con un  $PPD \leq 20\%$ .

### **Equazione del comfort di Fanger**

Gli indici di comfort secondo il modello di Fanger sono il PMV e il PPD. Evitando di entrare nei dettagli, in questa equazione i valori di PMV e PPD dipendono da 3 parametri personali - M (tasso metabolico), W (lavoro meccanico) e  $I_{CL}$  (resistenza termica abbigliamento) e da 4 parametri ambientali -  $t_A$  (temperatura dell'aria),  $t_{MR}$  (temperatura media radiante),  $v_A$  (velocità dell'aria) e  $p_v$  (umidità dell'aria). I parametri ambientali sono le variabili su cui agire per ottenere il desiderato grado di comfort. La normativa fornisce dei valori tipici a seconda della stagione, del tipo di attività fisica e del grado di resistenza dell'abbigliamento. A questo proposito è importante evidenziare che livelli di vestiario cospicui riducono il calore perso.

## Parametri ambientali e loro correlazione

Analizziamo più nel dettaglio i 4 parametri ambientali:

- temperatura dell'aria ( $t_A$ ): viene influenzata tramite riscaldamento e raffreddamento passivo e meccanico;
- temperatura media radiante ( $t_{MR}$ ): temperatura media ponderata di tutte le superfici esposte in una stanza. La temperatura media radiante varia fortemente con la posizione. In combinazione con la temperatura dell'aria permette di definire la temperatura operativa ovvero la temperatura uniforme dell'aria e delle pareti di un ipotetico ambiente, in cui il corpo umano scambierebbe la stessa potenza termica per radiazione e convezione che scambia nell'ambiente reale. La formula per il calcolo della temperatura operativa è:

$$t_0 = \frac{h_C * t_A + h_R * t_R}{h_C + h_R}$$

- velocità dell'aria ( $v_A$ ): quantifica la velocità e la direzione dei movimenti d'aria nella stanza. Correnti d'aria, che possono causare repentine fluttuazioni nella velocità dell'aria possono essere causa di situazioni di discomfort termico localizzato, con una sensazione di eccessiva dispersione termica. Il movimento dell'aria produce effetti termici anche senza variazione della temperatura dell'aria e può favorire la dissipazione del calore, attraverso la superficie dell'epidermide.
- umidità dell'aria ( $p_v$ ): livelli troppo alti o troppo bassi di umidità nell'aria possono causare situazioni di disagio. A basse temperature l'aria molto secca accresce la sensazione di freddo, mentre per temperature dell'aria superiori a 32 °C con valori di umidità relativa superiori al 70% si accentua la sensazione di caldo.

A livello indicativo riporto una figura (*Fig. 28*) con i valori consigliati per temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria a seconda della stagione:

	<b>estate</b>	<b>inverno</b>
Temperatura	24-26 °C	19-20 °C
Umidità relativa	50-60 %	40-50 %
Velocità dell'aria	0,1-0,2 m/s	0,05-0,1 m/s

*(Fig.28) Valori consigliati di umidità, temperatura e velocità a seconda della stagione.*

## ***CAPITOLO 4. IMPIANTO DI VMC***

### ***4.1. Cosa è un impianto di VMC***

La ventilazione meccanica controllata (VMC) è definita come “il processo di immissione e/o estrazione d’aria verso un ambiente confinato con lo scopo di controllare i livelli di inquinante, l’umidità o la temperatura” (ASHRAE 62.1-2020). Come si può dedurre dalla definizione dettata dall’ASHRAE, la VMC, favorisce il controllo di quello che viene definito “microclima”. Con questo termine si intendono quei parametri ambientali che condizionano lo scambio termico fra soggetto e ambiente in un luogo chiuso o semi-chiuso, come ad esempio un ambiente di lavoro. Considerando il corpo umano come una macchina termica, gli scambi termici che intervengono fra esso e l’ambiente, hanno lo scopo di mantenere costante la temperatura interna dell’organismo (a circa 37°C), ovvero di mantenere il “comfort termico”. Il nostro organismo deve mantenere un equilibrio in questo senso, poiché ampie variazioni termiche possono determinare sofferenze delle funzioni fisiologiche, fino a generare vere e proprie malattie e quindi creare “discomfort”. I parametri che determinano il benessere termico sono: la temperatura dell’aria, l’umidità relativa, la velocità dell’aria, il calore radiante emanato da sorgenti a temperatura superiore, il dispendio energetico, la resistenza termica del vestiario. Un aspetto che non può essere sottovalutato, come anticipato nei paragrafi precedenti, è la qualità dell’aria che è connessa al numero di ricambi orari. In ambito sia residenziale che pubblico/commerciale, l’impianto di VMC viene installato anche al fine di ottenere ricambi d’aria continui (0.5 vol/h) che forniscono aria nuova e pulita. Ciò è molto importante per la salute delle persone che vivono in quegli ambienti poiché vi è un miglioramento della qualità dell’aria indoor, permettendo di rinnovare l’aria respirata, andando così a ridurre la presenza degli inquinanti come i VOC (Componenti Organici Volatili) contenuti in vernici e rivestimenti protettivi, le sostanze chimiche contenute nei detersivi, il fumo di sigaretta, la CO<sub>2</sub>, i microrganismi diffusi con la respirazione, inquinanti provenienti dall’esterno e batteri che possono portare al contagio da COVID19.

Rispetto all'areazione naturale che si ottiene aprendo le finestre, la ventilazione meccanica offre la garanzia di un ricambio costante e adeguato; inoltre, evita la dispersione del calore (o del fresco) presente nell'ambiente, con il conseguente risparmio sui consumi di riscaldamento e raffrescamento ed evitando i repentini sbalzi termici; tutto a vantaggio del comfort. L'aria "viziata", insomma, non ha solo un cattivo odore, ma è piena di elementi invisibili e potenzialmente dannosi, oltre a presentare spesso un eccessivo livello di umidità. Se pensiamo che in media trascorriamo tra il 60 e l'80% del nostro tempo in ambienti chiusi come la casa, l'ufficio, l'università ecc. possiamo facilmente comprendere come la qualità dell'aria indoor dovrebbe essere una priorità per tutti.

#### ***4.2. Funzionamento di un impianto di VMC***

La VMC non fa altro che estrarre l'aria viziata dall'interno, gettarla all'esterno e in contemporanea immettere, all'interno, aria esterna, al fine di ottenere il numero di ricambi d'aria necessari. L'aria prelevata dall'esterno, prima di essere immessa all'interno, viene opportunamente filtrata attraverso l'utilizzo della microfiltrazione che riesce ad eliminare il particolato, il polline e altre sostanze presenti nell'aria esterna andando così a migliorare la qualità indoor di quell'ambiente. Nella maggior parte dei casi essa è dotata anche di uno scambiatore di calore/recuperatore di calore. L'aria viziata viene prelevata dall'ambiente e prima di essere espulsa all'esterno, viene convogliata all'interno dello scambiatore dove riscalda o raffresca l'aria pulita prelevata dall'esterno, a seconda se si voglia fare raffrescamento o riscaldamento. L'alta efficienza di recupero dello scambiatore di calore consente di recuperare quasi tutto il calore presente nell'aria in uscita e di trasferirlo all'aria in entrata, diminuendo sensibilmente la quantità di calore necessaria per riscaldarla. Ciò permette di ottenere un risparmio anche in termini energetici. La distribuzione dell'aria, che è una caratteristica importante per ottenere un'aria interna salubre, avviene grazie all'utilizzo di condotti, ovviamente dimensionati a seconda delle portate e della velocità d'immissione al fine di ottenere una distribuzione corretta.

### ***4.3. Tipologie di impianti di VMC***

Gli impianti di condizionamento possono essere più o meno complessi, ma occorre, in questo caso, fare una distinzione fra gli impianti che immettono aria dall'esterno ed impianti che ricircolano l'aria interna dei locali. Entrambi effettuano una filtrazione meccanica e una regolazione della temperatura e del valore di umidità.

Impianto di ventilazione meccanica con recuperatore di calore, più costoso e complesso, raramente è installato in luoghi residenziali mentre può essere utilizzato anche in uffici di modeste dimensioni. Il cuore dell'impianto è costituito da una unità ventilante (normalmente ubicata su terrazzi o in altri spazi tecnici) che provvede a filtrare l'aria prelevata all'esterno e a regolarne la temperatura ed il tasso d'umidità, prima di immetterla nuovamente nei locali attraverso diffusori o canali microforati posizionati sulle pareti o sulle controsoffittature. L'aria esausta viene aspirata dalla stessa unità attraverso apposite griglie ed espulsa all'esterno. Per contenere i consumi energetici, mediante opportuni scambiatori, il calore dell'aria esausta può essere recuperato e trasferito all'aria prelevata dall'esterno.

Il secondo tipo di impianto, denominato comunemente a split, è sicuramente più diffuso in abitazioni ed in piccoli uffici grazie al costo minore e alle minori complessità di installazione e manutenzione. Questi apparecchi sono costituiti da unità esterna e da una unità interna che può essere installata sulle pareti o sul soffitto del locale da condizionare. L'aria del locale viene filtrata meccanicamente, trattata termicamente, eventualmente deumidificata e nuovamente diffusa nello stesso locale. Alcuni modelli più evoluti possono essere collegati all'esterno e fornire anche il ricambio dell'aria.

In questo tipo di impianti si utilizza, un ciclo frigorifero in cui un gas viene compresso e successivamente lasciato libero di espandersi.

In questo modo si ottiene una cessione di calore nell'ambiente in cui avviene la compressione ed un raffrescamento nell'ambiente in cui avviene l'espansione. Nei modelli denominati a pompa di calore il ciclo di funzionamento può essere invertito per ottenere con lo stesso apparecchio il riscaldamento o il raffreddamento dell'aria del locale.

Gli impianti a split sono più facili da gestire perché le parti a contatto con l'aria sono minori e quindi si facilita la manutenzione. Questo tipo di impianto, però, non provvede il ricambio dell'aria dei locali. È importante questo aspetto perché, la necessità di conservare il benessere termico, può far dimenticare di aprire più volte al giorno le finestre per ricambiare l'aria ed allontanare gli inquinanti. Quando questi apparecchi vengono installati in ambienti già in uso occorre scegliere con attenzione il punto in cui installarli. Se il flusso d'aria colpisce direttamente gli occupanti, infatti, questi saranno esposti ad un discomfort da corrente d'aria che è responsabile di malesseri anche importanti a carico del sistema muscoloscheletrico. È preferibile installare gli apparecchi a soffitto perché si ottiene una migliore diffusione dell'aria ed una riduzione dei discomfort. Per completezza è opportuno ricordare che in molti ambienti, residenziali e per ufficio, sono installati impianti a termosifone. In questo caso l'acqua calda, prodotta da una centrale termica, raggiunge degli elementi radianti statici (radiatori) o provvisti di ventole (termoconvettori). I primi riscaldano l'aria per convezione mentre i secondi creano un ricircolo dell'aria del locale. Questi impianti sono in grado di regolare solo il riscaldamento dell'aria dei locali e sono richieste quindi altre installazioni per raffrescare l'aria, per regolare gli altri parametri microclimatici ed è necessaria l'apertura delle finestre per ricambiare l'aria. Gli impianti con immissione di aria esterna sono quelli in cui è necessario prestare maggiore attenzione all'igiene dato che, nell'unità di trattamento e nelle tubazioni, si possono verificare condizioni favorevoli alla proliferazione di funghi e batteri quando c'è un accumulo di sedimenti e di umidità. Questi impianti, favorendo un ricambio continuo, migliorano la qualità dell'aria eliminando più facilmente gli inquinanti indoor, tra cui i solventi provenienti dagli arredi, i vapori, i bioeffluenti ecc. Negli impianti con apporto di aria esterna è importante stimare il volume d'aria di ricambio tenendo conto del numero di persone presenti e del volume del locale. Nei casi in cui è necessario aprire le finestre è più difficile stimare i volumi d'aria in ingresso, ma può essere attendibile una stima dei tempi di apertura delle finestre basata sulla percezione olfattiva dell'aria esausta.

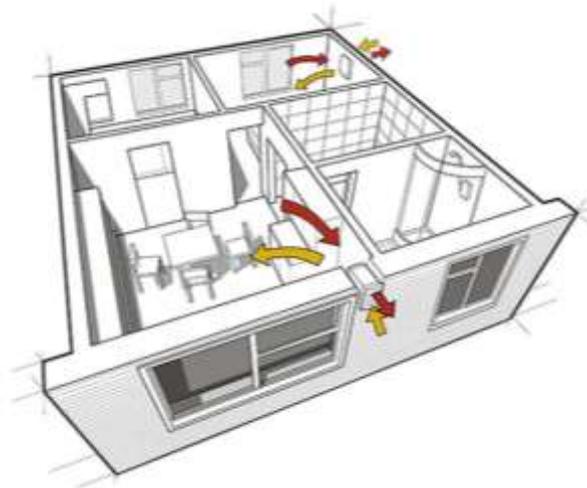
#### ***4.4. Impianti decentralizzati e centralizzati***

I sistemi di ventilazione meccanica controllata sono suddivisibili in due grandi macrocategorie: Impianto decentralizzato e Impianto centralizzato.

Non c'è una tipologia migliore dell'altra in assoluto, la scelta varia di caso in caso a seconda che si ragioni su un'installazione in cantiere piuttosto che in uno spazio già realizzato. In linea di massima, il sistema più conveniente adotta lo scambiatore di calore.

##### **Impianto decentralizzato**

Il sistema di ventilazione meccanica decentralizzata, detto anche VMC puntuale, si sceglie per installazioni su edifici già esistenti, e in genere su spazi ristretti dove non è possibile realizzare una vera e propria rete di distribuzione. Questa tipologia di impianto di ricircolo d'aria lavora localmente per singole stanze (*Fig. 10*).



(Fig. 10) Impianto VMC decentralizzato.

L'aria viene o immessa o estratta, e a seconda che la ventilazione lavori in immissione o in estrazione, si trova l'unità di tipo statico più consona: unità ventilanti da parete, applicazioni su cassonetti degli avvolgibili, o telai su serramenti.

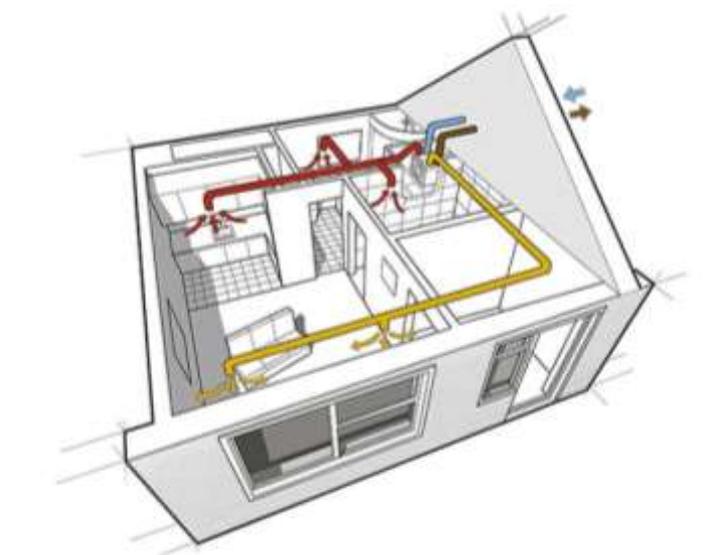
Alcuni dei vantaggi della VMC decentralizzata:

- poco invasiva;
- basso costo di investimento;
- minimo costo d'esercizio;
- facilità di posa in opera.

Le unità VMC puntuali non contribuiscono all'efficienza energetica con la stessa resa che hanno sistemi di ventilazione con recupero di calore.

### **Impianto centralizzato**

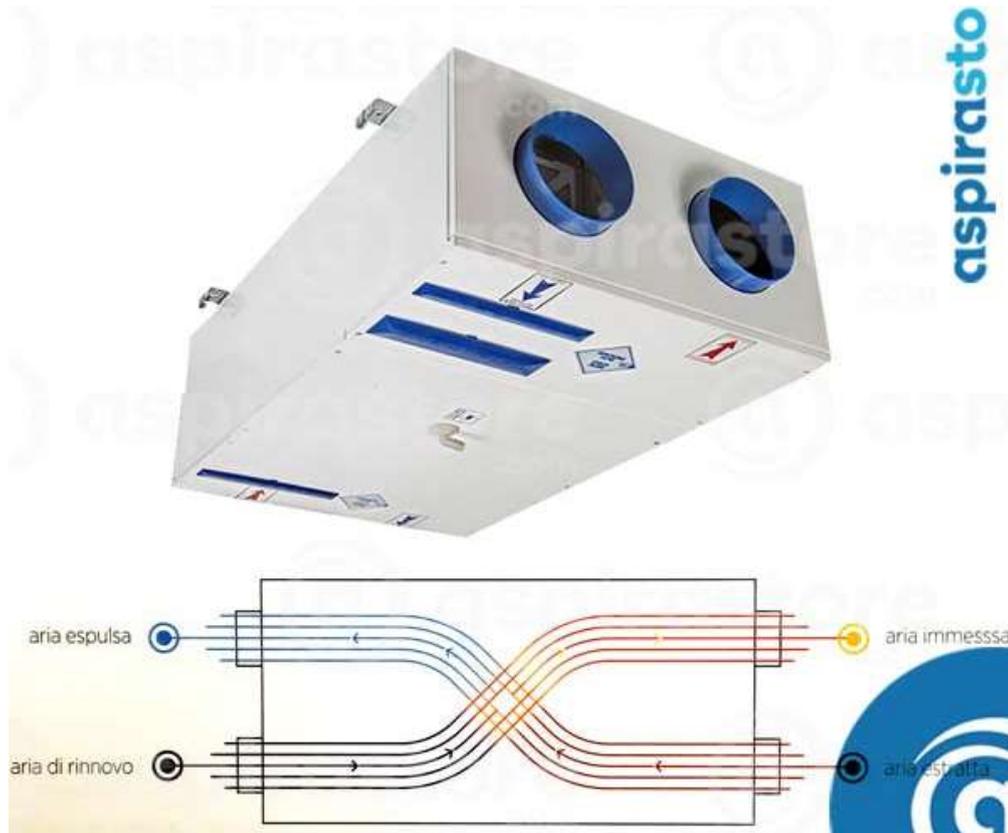
L'impianto VMC centralizzato è il sistema di ventilazione per il quale si ha la massima convenienza di installazione nel momento in cui si sta costruendo un nuovo edificio, o lo si sta ristrutturando di sana pianta. La VMC centralizzata (*Fig. 11*) lavora sull'immissione ed estrazione bilanciata dell'aria, che viaggia su canalizzazioni indipendenti: una linea dedicata alla mandata di aria nuova, e l'altra destinata alla ripresa dell'aria esausta ed insalubre; si parla di impianto a doppio flusso perché è in grado di svolgere contemporaneamente sia l'immissione che l'estrazione con due flussi separati.



(Fig. 11) Impianto VMC centralizzato.

La VMC a doppio flusso con flussi incrociati gestisce il ricircolo d'aria con una sola macchina (*Fig. 12*).

Rispetto al sistema a singolo flusso, quello a doppio flusso è più vantaggioso perché consente il recupero di calore dell'aria estratta con innalzamento del risparmio energetico e la filtrazione dell'aria.



(Fig. 12) Schema di un impianto centrale a doppio flusso incrociato.

I vantaggi della VMC centralizzata:

- il ricambio d'aria è continuo in tutto l'ambiente;
- si assicura la costanza di clima salubre e sano;
- uniformità e bilanciamento per l'equivalenza delle portate di immissione e di estrazione, scongiurando di mettere in pressione o depressione zone dello stesso ambiente;
- il raggiungimento delle portate d'aria in grado di soddisfare le condizioni ideali di temperatura e umidità;
- bassi consumi elettrici;
- silenziosità;

Gli svantaggi invece sono connessi al maggior assorbimento elettrico, al maggior costo d'investimento iniziale, e ai tempi più lunghi di lavoro in cantiere per via della creazione delle tracce per alloggio dei canali e tubazioni della doppia linea di mandata e ripresa dell'aria.

La VMC, il cui scopo primario è il trattamento d'aria, può contribuire a migliorare il bilancio energetico globale in affiancamento a macchine di condizionamento per la movimentazione dell'aria con funzioni di raffrescamento/riscaldamento in pompa di calore.

Esistono sostanzialmente due macro-tipologie di recuperatori di calore a doppio flusso: a parete (per installazioni in verticale all'interno di residenze) e a soffitto (controsoffitto per locali pubblici/commerciali). Soluzioni in base alla quantità di spazio a disposizione per l'installazione.

## ***CAPITOLO 5. COMPONENTI DELLA VMC***

Un impianto di ventilazione meccanica controllata è costituito da un insieme di componenti che permettono di ottenere oltre una certa qualità dell'aria all'interno anche un determinato comfort termico di un ambiente:

- Recuperatore di calore (scambiatore);
- Filtri;
- Canali di distribuzione;
- Terminali di estrazione e immissione;
- Silenziatori;
- Sistemi di regolazione e taratura;
- Serrande tagliafuoco.

### ***5.1. Recuperatore di calore***



*(Fig. 13) Macchina ventilante: Recuperatore di calore.*

Macchina ventilante (*Fig. 13*) che consente di preriscaldare l'aria nuova d'immissione assorbendo il calore dall'aria d'espulsione recuperando l'energia contenuta nell'aria estratta dalla casa e cedendola all'aria immessa dall'esterno, riducendo i consumi. E' in grado di immettere e estrarre aria grazie all'utilizzo di ventilatori interni ad esso. La tecnologia attuale degli scambiatori di calore è in grado anche di recuperare il calore latente.

La scelta del recuperatore viene fatta secondo tre parametri:

1. Latitudine e clima.
2. Superficie dell'ambiente.
3. Portata.

In riferimento al parametro superficie, la procedura per l'identificazione della giusta macchina prevede il calcolo delle perdite di carico nei condotti utilizzati per la distribuzione e della ripresa dell'aria, si confrontano le curve caratteristiche di portata e prevalenza della macchina identificata, e si verifica che il punto di lavoro sia al di sotto della curva caratteristica, per garantire le portate e la prevalenza di progetto.

Un parametro fondamentale dei sistemi di VMC è la portata di ventilazione, che indica la portata di aria trattata da ogni singolo ventilatore dell'unità e che si calcola in metri cubi/ora. Si tratta del principale valore da prendere in considerazione nel momento in cui si deve valutare il dimensionamento di un impianto e quindi la scelta del recuperatore di calore.

Per valutare la corretta quantità di aria da trattare in un'abitazione, la prima caratteristica da considerare è il volume degli ambienti da areare. Il ricambio di aria varia normalmente da 0,3 vol (litri)/ora, corrispondente al tasso di ricambio della ventilazione naturale aprendo saltuariamente le finestre, fino a 0,8 vol/h, un tasso oltre il quale i benefici derivanti dall'apporto di aria fresca non sono più percepibili. Generalmente si prende come riferimento ottimale di ricambio d'aria un valore intermedio, pari a 0,5 vol/h, e si calcola la portata totale dell'impianto di VMC moltiplicando il volume totale da areare per 0,5. Inoltre, si possono considerare differenti elementi aggiuntivi che possono determinare scelte specifiche:

- utilizzo dei locali;
- numero di occupanti;
- presenza di inquinanti.

In base alla normativa attuale (UNI 10339), la portata di ventilazione di un impianto deve essere in grado di produrre almeno 40 vol/h per ogni persona che occupa abitualmente l'abitazione.

La scelta della macchina di ventilazione deve essere fatta in base a questi valori, tenendo presente che è bene evitare di far lavorare i sistemi alla massima portata, altrimenti possono diventare rumorosi; in sostanza, è meglio far lavorare un ventilatore più grande ma impostato a una portata dell'80%.

Le principali caratteristiche di un moderno recuperatore di calore sono:

- scambiatore di calore interno, in controcorrente a flussi incrociati (per installazioni in linea);
- ventilatori con motori plug fan EC di ultima generazione;
- free-cooling (detto anche by pass automatico): è la ventilazione diretta che avviene quando non è conveniente recuperare il calore dell'aria espulsa, come in estate. In questa condizione entra in gioco la valvola di bypass che esclude lo scambiatore di calore;
- protezione antigelo (defrostring): quanto l'umidità relativa (UR%) dell'aria esterna è tale da provocare presenza di ghiaccio nel recuperatore, interviene una specifica valvola di antigelo;
- deumidificazione: ideale per il rinnovo dell'aria in ambienti dotati di raffrescamento radiante;
- ridotto consumo energetico;
- scarico per drenaggio umidità;
- velocità regolabile;
- opzionale su alcuni recuperatori è la batteria di preriscaldamento: serve a preriscaldare l'aria esterna in entrata prima che venga immessa nell'apparecchio di ventilazione;
- gestione dei comandi di controllo tramite app smartphone e connessione wi-fi;
- sistema filtrante: i filtri solitamente impiegati sono quelli di tipo in fibra sintetica classe G4 ed F a maglie fini.

## 5.2. Filtri

I filtri dell'aria sono una parte fondamentale dei sistemi di VMC, in quanto purificano l'aria in entrata, eliminando i numerosi inquinanti presenti nell'aria esterna, come da capitolo 2.3.

Esistono varie tipologie di filtri ma i più diffusi sono quelli ad azione meccanica a tasche (Fig. 14), che offrono il vantaggio di garantire una maggior superficie filtrante rispetto ad un filtro a celle piane (Fig.15).



(Fig.14) Filtro a tasche.



(Fig. 15) Filtro a celle piane.

I filtri per i sistemi di trattamento e condizionamento dell'aria sono classificati in vari modi, tra cui la classificazione internazionale definita dalla norma EN 779, che stabilisce la tipologia di filtro a seconda delle sue prestazioni.

Secondo questa normativa, i filtri si dividono in quattro categorie:

- filtri grossolani (G), in grado di fermare le polveri pesanti;
- filtri fini (F), che arrestano ceneri, polveri sottili come PM10 e PM2,5, pollini e batteri;
- filtri assoluti HEPA (H), in grado di fermare le polveri ultrafini ed i virus;
- filtri assoluti ULPA (U), che arrestano anche le molecole gassose.

La scelta del filtro va valutata non solo in riferimento all'efficienza di filtrazione, ma anche tenendo in considerazione la quantità d'aria che è necessario ricambiare ogni ora e le condizioni dell'aria all'esterno del locale dove è installata la VMC. Infatti, un filtro ad altissima efficienza offre una maggior resistenza al flusso d'aria, riducendo la portata oraria di aria ricambiata con possibile aumento della rumorosità.

I filtri della VMC sono efficaci nel purificare l'aria inquinata, ma devono essere sostituiti con regolarità, almeno ogni sei mesi o più spesso se si vive in zone inquinate, e comunque non appena la macchina segnala la necessità di effettuare la sostituzione, solitamente tramite le apposite spie luminose.

### ***5.3. Canali di distribuzione***

I canali di distribuzione sono condotti al cui interno passa l'aria necessaria per la ventilazione. Ultimamente, tali canali vengono costruiti con un isolamento acustico integrato. I più efficienti, come spiegato in precedenza, sono i sistemi a doppio flusso in cui le condotte di distribuzione sono separate. In questo caso, un condotto controlla e regola l'immissione dell'aria, mentre l'altro è dedicato all'estrazione. I flussi d'aria nei due tubi sono gestiti da due differenti ventilatori elettrici.

In fase di progettazione è importante progettare il punto di uscita del condotto di estrazione lontano a quello dell'immissione, per evitare che i due flussi si contaminino.

A seconda delle possibilità di installazione, la distribuzione può essere:

- A vista;
- In traccia.

#### **Distribuzione a vista**

I condotti per la distribuzione dell'aria a vista sono generalmente costruiti in lamiera di acciaio zincato. Il circuito di immissione dell'aria viene coibentato nei rispetti normativi in ambito di risparmio energetico con lamierini di varie tipologie come: rame, acciaio inox, alluminio o più semplicemente in acciaio verniciato RAL.

#### **Distribuzione in traccia**

I condotti per la distribuzione dell'aria in traccia sono realizzati in materiale polimerico al fine di resistere meglio all'aggressione dei prodotti contenuti nelle malte o nel calcestruzzo. Per ridurre gli ingombri, sono realizzati con forma ovale/rettangolare per la distribuzione principale. Per le derivazioni finali vengono solitamente adottati canali di forma circolare rigida o flessibile.

### ***5.4. Terminali di estrazione e immissione***

#### **Terminali di emissione**

I terminali di immissione dell'aria sono di innumerevoli forme e colori. Solitamente vengono selezionati al fine di trovare la massima integrabilità architettonica e con caratteristiche costruttive tali da garantire la possibilità di poter modificare o gestire il flusso dell'aria in modo da eliminare la stratificazione e le correnti/flussi ascendenti che potrebbero investire gli occupanti.

#### **Terminali di estrazione**

I terminali utilizzati per l'estrazione dell'aria non richiedono grandi caratteristiche se non una certa attenzione nella selezione, al fine di ridurre la rumorosità. Negli ambienti dove vi è solo estrazione d'aria, solitamente si prevede l'installazione di griglie di transito su pareti o porte di accesso al locale, o più semplicemente, è necessario prevedere che la porta sia leggermente rialzata rispetto al pavimento.

### ***5.5. Silenziatori***

Un impianto VMC, oltre a dover essere dimensionato per garantire condizioni igieniche interne ottimali, deve essere anche silenzioso soprattutto quando serve locali nei quali è necessaria la massima silenziosità. È per questo motivo che molto spesso gli impianti di VMC vengono completati con l'installazione di sistemi che permettono il corretto abbattimento acustico. A tal proposito vengono utilizzati silenziatori ed eventuali griglie afoniche per le prese dell'aria esterne e d'espulsione.

### ***5.6. Sistema di regolazione e taratura***

Per poter bilanciare correttamente un impianto VMC, garantire che ogni ambiente abbia il giusto apporto di aria e sia garantita una corretta estrazione al fine di eliminare gli odori, è necessario installare dei sistemi di taratura che possono essere di tipo statico, come per esempio le serrande, o di tipo dinamico, ossia elementi costituiti da membrane in materiale siliconico o palette dotate di molle pretarate che sono in grado di mantenere la portata d'aria costante al terminale anche con variazioni di portata da parte dell'unità di ventilazione. Soddisfare la richiesta da parte dell'utenza in tempi brevi non è semplice; è opportuno installare un sistema di controllo (sensori, attuatori) che sia in grado di dare il quadro della situazione generale ambientale per poi riuscire a migliorare, lì dove servirà, le prestazioni della VMC aumentando/diminuendo la portata o la temperatura d'immissione.

### ***5.7. Serrande tagliafuoco***

Nei casi in cui i condotti di distribuzione debbano attraversare locali per i quali è richiesta una certa resistenza al fuoco, deve essere garantito il mantenimento di tali caratteristiche in caso di emergenza. Il canale, quindi, non deve fungere da ponte attraverso il quale le fiamme possano propagarsi ad altri locali. A tal proposito vengono utilizzate serrande tagliafuoco, griglie intumescenti o sistemi equivalenti.

## ***CAPITOLO 6. CASO DI STUDIO***

### ***6.1. Introduzione al caso di studio***

Il caso di studio preso in considerazione è ubicato all'interno dell'università di economia Giorgio Fuà situata in Ancona. Si tratta di un'aula universitaria, più precisamente dell'aula B (Fig. 16), utilizzata sia per lezioni e convegni che per lo svolgimento delle sedute di laurea; la si può considerare come un ambiente ad elevato affollamento.



*(Fig. 16) Panoramica Aula B*

Dalla figura si può notare come l'aula rappresenti un'ambiente dove il virus SarsCov-2 può circolare e contagiare liberamente, senza l'intervento della ventilazione meccanica, in quanto essa è priva di aperture dirette verso l'esterno; non è garantita la ventilazione naturale ai fini di ottenere il numero minimo di ricambi orari che, come detto, è alla base della qualità e salubrità dell'aria.

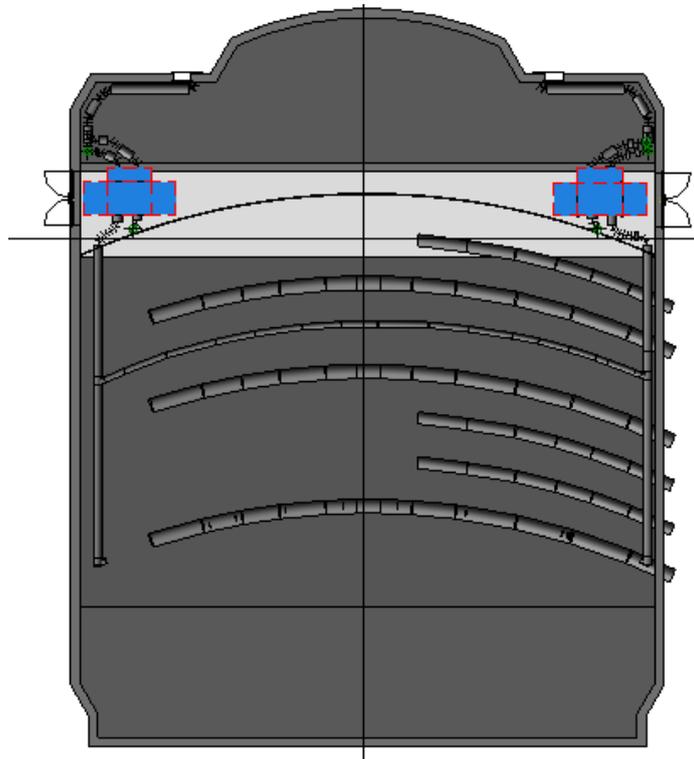
Ai fini di conoscere l'effettivo rischio di contagio all'interno dell'aula si parte in primis attraverso quelle che sono le caratteristiche fisiche della stanza (volume, livello occupazionale) strettamente legate ai parametri che vanno ad influire sulla qualità dell'aria indoor. Il livello occupazionale, essendo anche un'aula nella quale si svolgono convegni e sedute di lauree, è abbastanza elevato: 350 posti a sedere per un volume pari a  $1729.21 m^3$ . L'aula in questione, prima dell'installazione di un secondo impianto dovuto alla pandemia, è dotata di una ventilazione meccanica collegata ad una UTA (unità trattamento aria) situata nei piani inferiori della struttura.

Questa ventilazione è stata installata al solo fine di migliorare le caratteristiche termo igrometriche, ovvero ottenere il comfort termico come unico scopo, infatti è in grado di effettuare riscaldamento e raffrescamento a seconda della stagione.

In un secondo momento, a causa della pandemia da COVID-19, è stato installato nell'estate 2020 un impianto accoppiato a due recuperatori RTD (recuperatori termodinamici) per andare a ridurre il rischio di trasmissione del virus e per ripartire con le attività in tutta sicurezza.

## ***6.2. Analisi impianto***

Come già anticipato, la ventilazione meccanica (*Fig. 17*) all'interno dell'aula presa come caso di studio, è garantita da un impianto preesistente collegato ad una UTA più il nuovo impianto accoppiato a due recuperatori RTD.



*(Fig. 17) Schema impianto della ventilazione meccanica*

I due impianti sono facilmente distinguibili perché hanno i canali di distribuzione con diametri differenti.

- Impianto preesistente: diametri pari a 45 cm.
- Impianto nuovo: diametri pari a 30 cm per la distribuzione primaria e 20 cm per la secondaria.

I due elementi di colore blu sono i nostri due recuperatori RTD posti in uno spazio superiore all'aula accessibile da una scala esterna.

### Recuperatore di calore

L'attrezzatura principale del nuovo impianto sono sicuramente i due recuperatori di calore (Fig. 18).



(Fig. 18) Recuperatore di calore

I due recuperatori in questione sono prodotti dalla AERMEC e dalla loro targa (Fig. 19) è stato possibile conoscere il modello, molto importante per definirne le prestazioni.



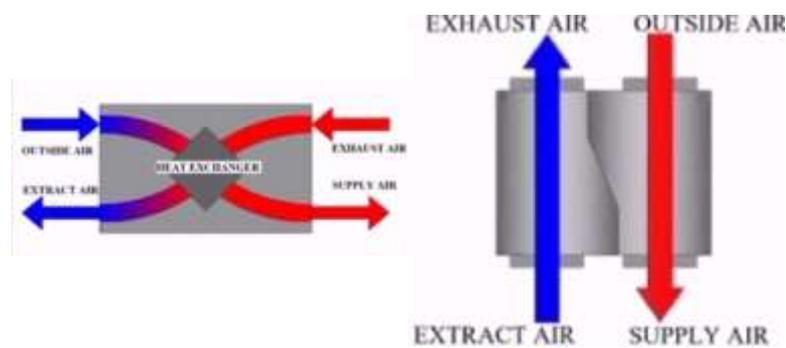
(Fig. 19) Targa del recuperatore di calore

Si tratta di un recuperatore di calore RTD 11 della AERMEC. Andando a visionare la scheda tecnica del recuperatore in questione si sono ricavate le prestazioni della macchina:

- PORTATA: max  $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ ; min  $950 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- FILTRI: modello MF5R1 con efficienza 85%.
- DIMENSIONI: altezza 43 cm; lunghezza 105 cm; profondità 110 cm.

La portata d'immissione rientra in quei parametri che possono ridurre il rischio di trasmissione e per questo deve essere fatta una valutazione in merito ad essa e al grado di affollamento dell'aula; ne discuteremo nel capitolo successivo.

È una macchina molto interessante perché si tratta di un recuperatore termodinamico e non di un semplice recuperatore statico. La grande differenza tra i due riguarda il ricircolo (*Fig. 20*) dove in quello statico i flussi d'aria sono incrociati nello scambiatore mentre, in quello termodinamico i flussi d'aria sono fisicamente separati. Il fatto che i due flussi sono separati evita ogni discussione a riguardo del ricircolo perché in questo modo non ci possono essere contaminazioni tra l'aria di rinnovo e l'aria espulsa.



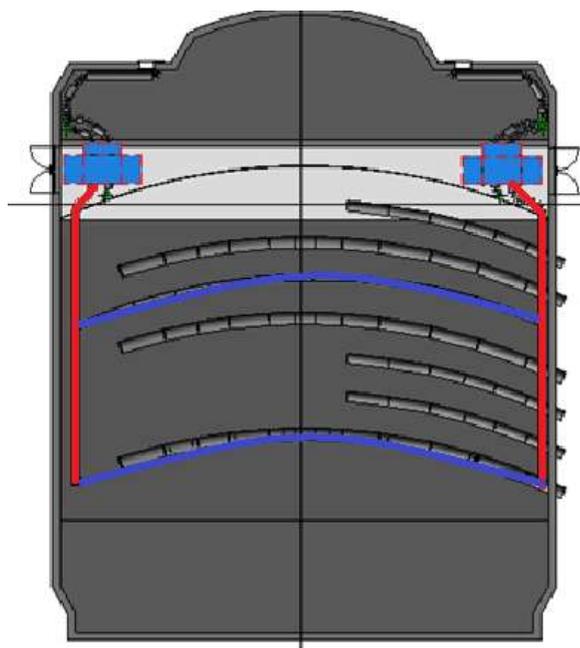
(Fig. 20) Differenza nello scambio termico tra un recuperatore statico e uno RTD

Il recuperatore termodinamico recupera il calore dall'aria espulsa per via termodinamica attraverso il circuito frigorifero reversibile di cui è dotato. Il circuito termodinamico è stato progettato per ottimizzare lo scambio termico tra aria espulsa ed aria di rinnovo ed è equipaggiato con compressore ad inverter ad alta efficienza energetica e bassa emissione sonora; l'utilizzo della valvola elettronica rende il funzionamento di RTD versatile ed affidabile.

La massima attenzione all'efficienza energetica ha portato all'introduzione di ventilatori plug-fan EC inverter di ultima generazione; a questo si aggiunge l'assenza delle perdite di carico che sono tipiche dei recuperatori statici. Le logiche di controllo rendono RTD particolarmente versatile nell'applicazione: il controllo della temperatura in mandata a punto fisso permette di servire i diversi locali in condizioni neutre. La possibilità di controllare la portata dell'aria anche sulla base della indoor air Quality permette di conseguire notevoli risparmi energetici ed economici. RTD è gestibile dai più diffusi ed evoluti sistemi di controllo e gestione o tramite web server a seconda della domanda da parte dell'utenza. Agevole sarà la manutenzione ordinaria e straordinaria grazie al facile accesso laterale ai diversi componenti.

### **Distribuzione**

Per la distribuzione con la quale l'aula viene servita, come già accennato, vi è una distribuzione primaria e una secondaria. Per capire bene il loro posizionamento si guardi (Fig. 21). La primaria (segnata in rosso) utilizza canali in acciaio inox con diametro da 45 cm, mentre la secondaria (segnata in blu), canali microforati sempre in acciaio inox da 30 cm. Entrambe sono a vista nel soffitto, ancorate con opportuno staffaggio.



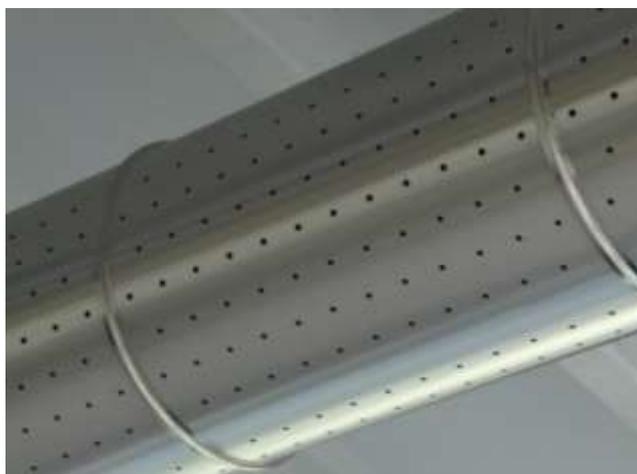
(Fig.21) Rappresentazione della distribuzione

Si è accennato che la distribuzione secondaria utilizza canali microforati; i due bracci segnati in blu, quindi, rappresentano i terminali di immissione del nuovo impianto.

I canali microforati (*Fig. 22*) sono progettati in modo da massimizzare la distribuzione ed il trattamento dell'aria anche al cambiare delle sue caratteristiche legate alla temperatura, come per esempio in estate ed in inverno. In tal modo, si limitano i fenomeni come la stratificazione dell'aria che si manifesta frequentemente nei sistemi di distribuzione aria con bocchette. Massimo comfort, grazie all'assenza di correnti d'aria percepibili, alte prestazioni, grazie alla possibilità di installazione anche in grandi altezze, economicità, dovuta alle caratteristiche di anticondensa, che non ne richiedono la coibentazione termica. I micro-fori migliorano, quindi, l'efficienza dei canali microforati, rispetto a quelli realizzati con bocchette, che in ogni caso, richiedono una maggiore manutenzione.

Circa le forme, i canali microforati possono essere circolari o semicircolari. La forma circolare è quella ideale anche per gli altri tipi di canali, infatti, nei canali con forma circolare, rispetto a quelli con sezione rettangolare ed a parità di portata d'aria, si hanno minori perdite di carico, ossia, di resistenza opposta al passaggio dell'aria. Il rapporto di induzione qualifica la bontà di un canale microforato. Esso è espresso, per ora, dalla divisione tra i litri di aria uscenti dal canale e quelli di aria indotta, ossia i litri di aria ambiente tra di essi miscelati. Tali rapporti possono assumere, in funzione delle applicazioni valori che vanno da 1 a 5 ad 1 a 30.

Inoltre, per far fronte alle diverse esigenze di design, i Canali Microforati possono essere realizzati in lamiera zincata, acciaio inox e alluminio o in tessuto.



(*Fig. 22*) Canale microforato

La ripresa dell'aria esausta all'interno dell'aula è svolta da due plenum di ripresa posti nella parte superiore mentre, l'espulsione e l'aria di rinnovo sono entrambe collocate nell'ambiente dove sono installati i due recuperatori (Fig. 23).



*(Fig. 23) Panoramica della distribuzione di espulsione e di rinnovo*

Questo impianto permette, a differenza del preesistente, una manutenzione ordinaria sia per i due recuperatori che per tutta la distribuzione. Mantenere pulito l'impianto è sicuramente fondamentale per evitare e/o ridurre la contaminazione con agenti infetti che si depositano lungo tutta la distribuzione. Ai fini della qualità dell'aria questi impianti devono essere sottoposti continuamente a lavori di manutenzione per evitare di vanificare i vantaggi che può dare, in materia di qualità e salubrità dell'aria, in una situazione di normalità.

## ***CAPITOLO 7. MONITORAGGIO***

### ***7.1. Metodologia e strumentazione***

Il primo passo per andare a studiare la ventilazione dell'aula è stato il rilievo architettonico con l'aiuto del disto (strumento laser per rilievi architettonici); passaggio importante ai fini della convalidazione del modello su software Revit. La restituzione grafica è stata poi completata con l'implementazione degli impianti, tramite un modello meccanico. L'obiettivo di questo studio è capire quali sono i vantaggi apportati dal nuovo impianto all'interno dell'aula in materia di qualità dell'aria al fine di ridurre la trasmissione da COVID-19. Per arrivare a studiare e analizzare i parametri (UR, velocità dell'aria, temperatura) strettamente connessi alla trasmissione virale, si sono svolti due rilievi:

- *1) RTD spento + UTA spenta.*
- *2) RTD acceso + UTA spenta.*

I rilievi si sono svolti nello stesso periodo di tempo, ovvero tra il 17/06/2021 e il 22/06/2021, al fine di avere una stessa situazione climatica esterna la quale va ad influire sui parametri termo igrometrici dell'aula e rendere il lavoro attendibile. Come strumento di rilievo si è utilizzata, grazie all'aiuto del Dott. Ing. Luca Tarabelli, la Stazione Comfort Service di Dantec Dynamics (Fig. 24) dove si sono andati ad installare i sensori relativi a determinati parametri.

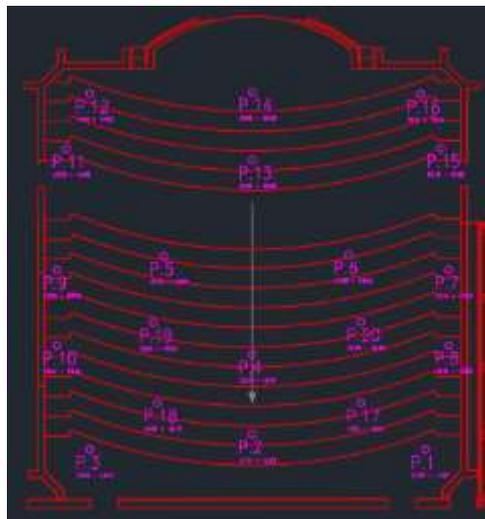


*(Fig. 24) Stazione Comfort Service di Dantec Dynamics.*

Con l'aiuto della figura 24 andiamo a elencare i sensori partendo dal basso:

1. Sensore Temperatura + Velocità dell'aria; altezza caviglie: 10 cm;
2. Sensore Temperatura + Velocità dell'aria; altezza bacino: 60 cm;
3. Sensore Temperatura Operativa (globo termometro); altezza 85 cm con inclinazione di 45 °C;
4. Sensore Temperatura + Velocità dell'aria; altezza spalle: 110 cm;
5. Sensore Umidità Relativa;
6. Sensore  $CO_2$ .

La stazione permette di monitorare contemporaneamente UR, tre temperature (altezza caviglie, bacino e spalle di una persona seduta) più tre velocità dell'aria con gli stessi sensori della temperatura, temperatura operativa e quantità di  $CO_2$  (che non sarà preso in considerazione perché durante il rilievo l'aula era vuota; non attendibile). Questi sensori sono poi collegati ad una centralina per l'elaborazione e restituzione dei dati. Essa non fa altro che trasformare un segnale analogico in un segnale digitale per poi trasferirli ad un PC. Per ottenere una situazione reale e attendibile della stanza, la stazione è stata spostata in 20 punti della stessa (Fig. 25), stazionando in ognuno di essi per 10 minuti.



(Fig. 25) Suddivisione della stanza in 20 punti

Il PC che raccoglie i dati della centralina, è in grado anche di restituire i due parametri del comfort termico, ovvero PMV e PPD. Per calcolarli si è impostato il metabolismo (1.1 met) e il vestiario (0.5 clo) che corrisponde al vestiario estivo.

## 7.2. Rilievo RTD spento

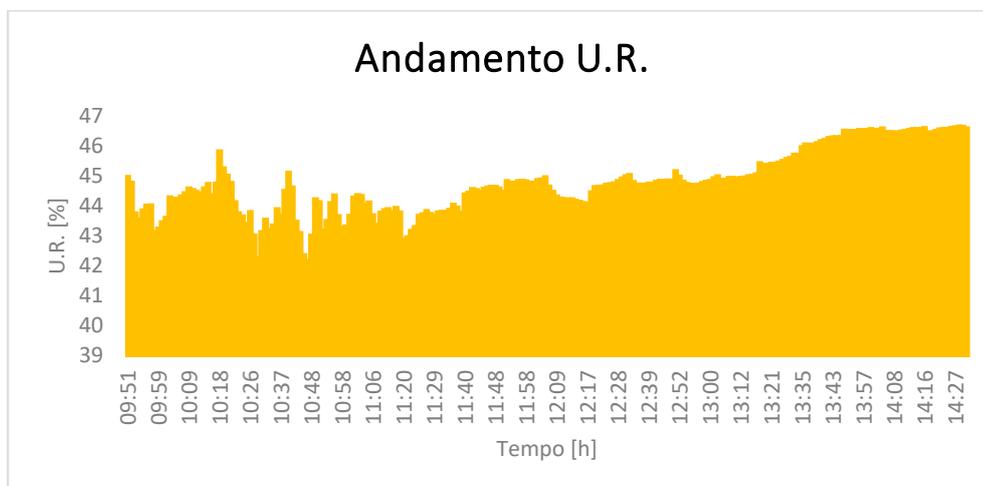
Nei successivi capitoli si va ad introdurre quelli che sono i dati inerenti ai rilievi effettuati con la Stazione Comfort Service. I segnali analogici dei sensori convertiti dalla centralina in digitali, sono stati inseriti in un file Excel dove è possibile monitorare la situazione secondo per secondo dell'intera durata del rilievo. Il file consegnatomi dall'Ing. Luca Tarabelli è stato rielaborato da me, andando a mediare minuto per minuto ogni singolo rilievo inerente a ciascuno dei venti punti della stanza presi in considerazione.

In questo rilievo non avevamo situazioni di ventilazione meccanica perché sia l'impianto preesistente che il nuovo erano spenti. I parametri in questo caso erano influenzati dalla sola situazione climatica esterna.

TEMPERATURA MEDIA	24 °C
VELOCITA' ARIA MEDIA	13 Km/h
UMIDITA' MEDIA	46 %

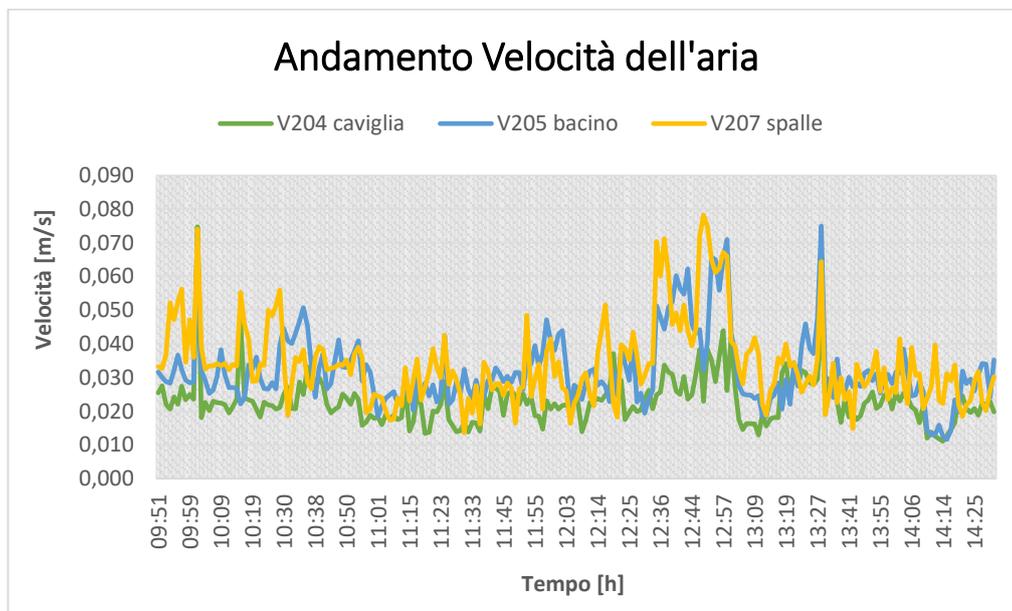
Dai dati del rilievo si sono andati a tracciare gli andamenti dei parametri che vanno ad influire sulla trasmissione. In ordine troviamo:

1. Umidità relativa (*Fig. 29*);
2. Velocità dell'aria (*Fig. 30*);
3. Temperatura (*Fig. 31*).



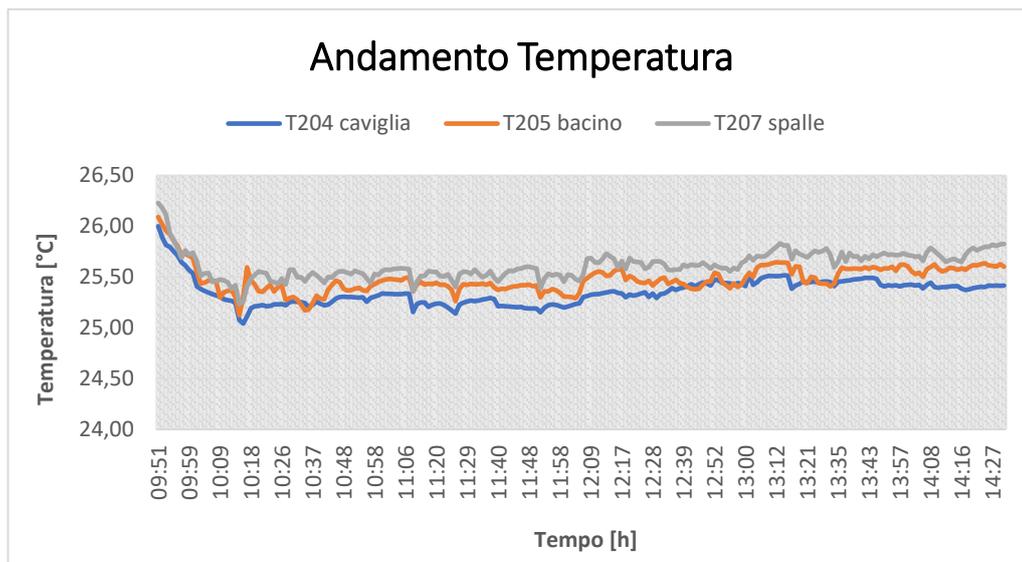
(Fig. 29) Andamento U.R. con impianto spento

In figura notiamo che l'umidità relativa oscilla tra 42% e circa il 47% nelle ore più calde della giornata. Questi valori, se confrontati con il valore dell'umidità relativa media esterna di quel giorno, sono simili; è molto influenzata dall'UR esterna. Quello che interessa maggiormente è capire se questi valori aumentano o meno il rischio di trasmissione. Lo studio citato nel capitolo 3.1 [39] spiega come per umidità pari e inferiori al 40% si verifica l'aumento del grado di arricchimento delle goccioline, attivando l'evaporazione dell'acqua nelle goccioline della tosse, che portano al restringimento delle stesse e alla sospensione prolungata nell'aria, mettendo a rischio la salute delle persone perché esposte per più tempo al virus. I valori registrati, non si discostano di molto da quella che è considerata la soglia minima, anzi, sono molto vicini.



(Fig. 30) Andamento velocità dell'aria con impianto spento

Le velocità dell'aria registrate dai sensori sono molto basse con picchi minimi e massimi che vanno da 0,01 a 0,08 m/s; ciò è dovuto al fatto che non c'era ventilazione, né meccanica e né naturale. Nonostante non ci fosse nessun tipo di ventilazione, l'aria, anche se con valori bassissimi, si muoveva. Potrebbe essere legato a diversi fattori come, ad esempio, la convezione che è in grado di spostarla e quindi creare una ventilazione, seppur minima.



(Fig. 31) Andamento temperatura con impianto spento

Il fattore temperatura legato a certi valori di umidità influisce sulla trasmissione, soprattutto quando si parla di aerosol.

Dal grafico colpisce il concetto di stratificazione del calore nell'ambiente. Nella stessa postazione e stesso minuto, la differenza tra la temperatura T204 (caviglia) e T207 (spalle) è di circa 0.2 °C. Questa differenza di temperatura può attivare il movimento dell'aria, e quindi ventilazione, per effetto della convezione.

### 7.3. Rilievo RTD acceso

Anche se per questo rilievo è stato attivato l'impianto di ventilazione con i due recuperatori termodinamici, di seguito saranno riportati i valori dei parametri relativi al giorno del rilievo.

TEMPERATURA MEDIA	27 °C
VELOCITA' ARIA MEDIA	9 Km/h
UMIDITA' MEDIA	48 %

Durante l'accensione si sono impostate, dal pannello di controllo di ciascuno dei due recuperatori, la portata e la temperatura di mandata (Fig. 32).



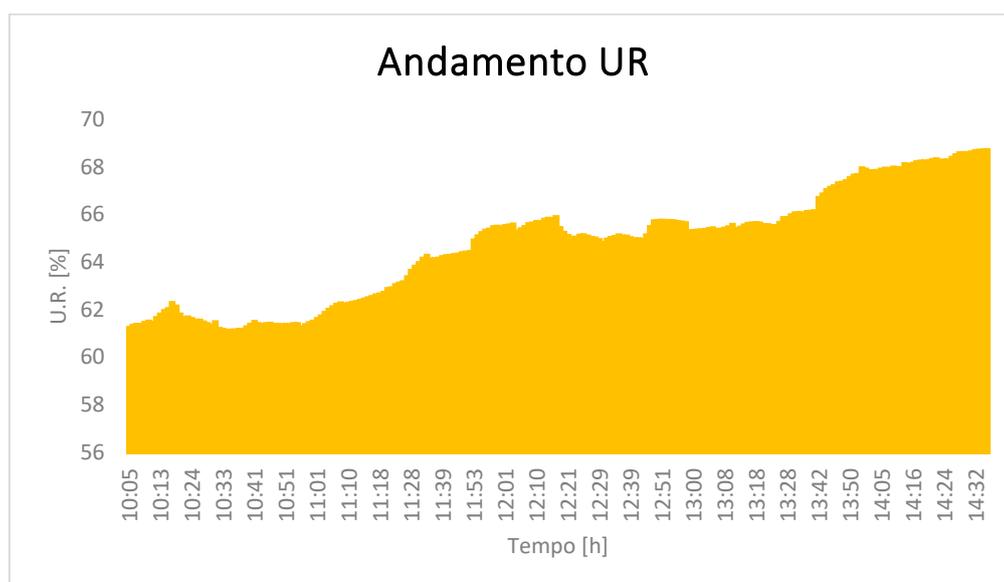
(Fig. 32) Impostazioni di mandata del recuperatore

Sapendo che i recuperatori sono 2, la portata totale immessa nell'aula sarà di:

$$1200 * 2 = 2400 [m^3/h].$$

Andamento dei parametri:

1. Umidità relativa (Fig. 33);
2. Velocità dell'aria (Fig. 34);
3. Temperatura (Fig. 35).

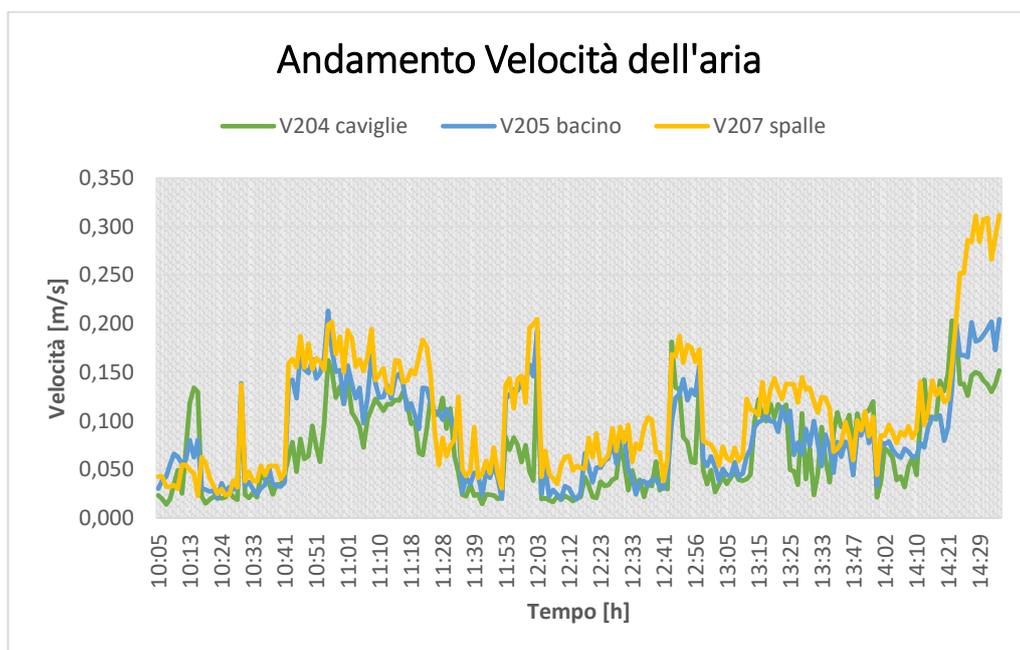


(Fig. 33) Andamento U.R. con impianto acceso

Andando a fare il confronto con i valori di umidità relativa ottenuti con l'impianto spento, subito salta all'occhio la differenza: circa il 20% in più rispetto alla situazione di impianto spento.

Analizzando i valori registrati con quelli esterni di umidità relativa media, relativi al giorno del rilievo, si verifica un discostamento, quasi il 20% in più. Nella situazione di impianto spento, le condizioni esterne con i relativi parametri, influenzano molto i parametri interni; ciò non accade con impianto acceso in quanto è esso stesso che va ad influire sull'umidità relativa.

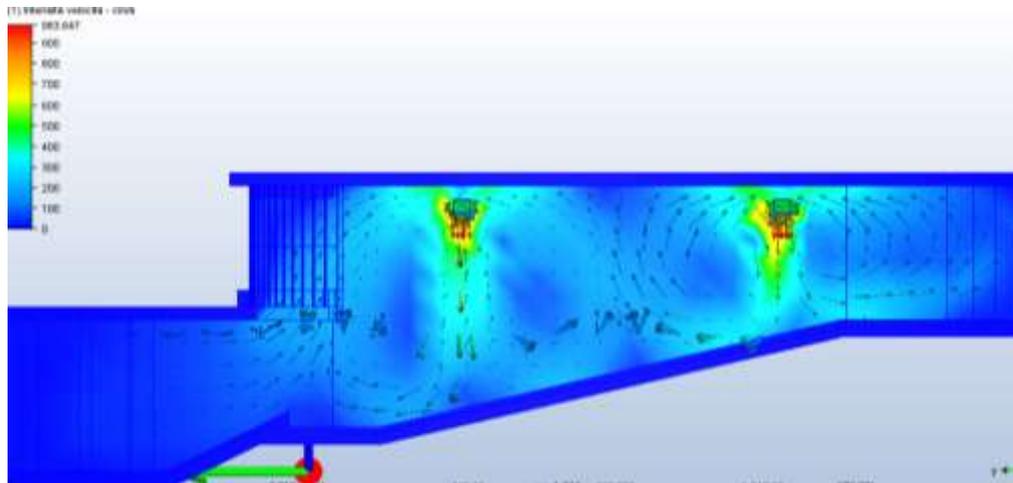
L'impianto mi garantisce di ottenere valori di UR che oscillano tra il 61% e 68%. Nel seguente capitolo saranno analizzati e messi in relazione con gli studi effettuati in merito alla trasmissione del COVID-19, andando a identificare quelli che sono i rischi.



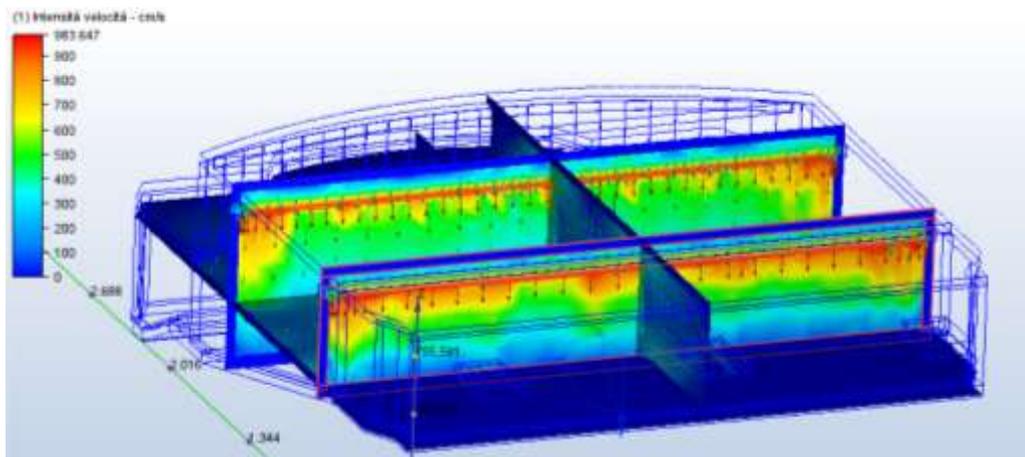
(Fig. 34) Andamento velocità dell'aria con impianto acceso

Le velocità aumentano rispetto al precedente rilievo, con l'impianto acceso si vanno a toccare valori come 0,3 m/s. Questo aumento è dovuto al fatto che l'impianto immette una portata nell'ambiente a una determinata velocità.

Questa velocità che l'impianto immette, è stata studiata sul CFD, ovvero un software che ci aiuta nello studio della fluidodinamica, e ci permette di capire la velocità e il movimento dell'aria (Fig. 35) (Fig. 36).



(Fig. 35) Grafica della velocità e movimento dell'aria (2D)



(Fig. 36) Grafica della velocità e movimento dell'aria (3D)

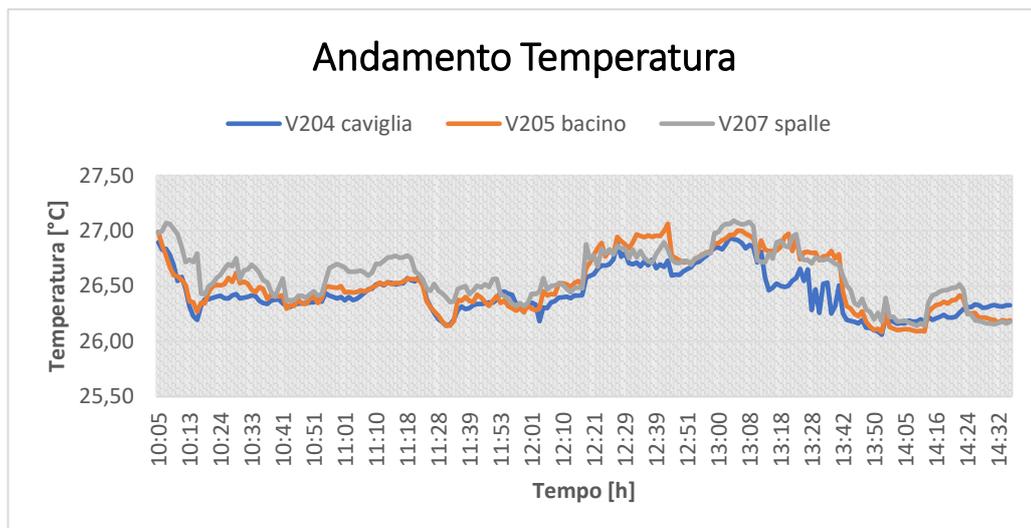
Volendo commentare la restituzione grafica 2D (Fig. 35) della velocità dell'aria, notiamo che in prossimità dei canali d'immissione, si hanno velocità che si aggirano intorno a 1,2 m/s. Questa velocità è stata impostata come "condizione iniziale" ed è stata ricavata tramite la formula:

$$v = \frac{Q}{A}$$

dove:

- a.  $Q$  è la portata, ovvero  $2400 [m^3/h]$ .
- b.  $A$  è l'area dei canali d'immissione,  $5,7 [m^2]$ .

Questo per quanto riguarda la zona elevata della stanza, ovvero la zona dove sono installati i canali d'immissione, mentre, a livello delle sedute la velocità corrisponde ai valori ottenuti nel monitoraggio, ovvero da  $0.1 \text{ m/s}$  a  $0.3 \text{ m/s}$ ; con ciò possiamo considerare il modello grafico uno strumento valido per lo studio di un impianto di ventilazione. In alcuni punti, come ad esempio nell'intermezzo tra i due canali, vi è la presenza di due vortici, dove le velocità dei due canali si vanno a sommare. Se riprendiamo la (Fig. 34), nel tratto finale, notiamo un incremento della velocità. Questo incremento è dovuto alla presenza dei due vortici. Non è un caso che gli ultimi stazionamenti del rilievo, ovvero quelli effettuati in quel lasso di tempo (14:12 – 14:32) si trovino proprio in quella zona dell'aula, come lo si può notare dalla (Fig. 24).



(Fig. 37) Andamento temperatura con impianto acceso

Paragonandolo con il grafico ad impianto spento, le temperature, si evolvono nell'intervallo tra  $26 \text{ °C}$  e  $27 \text{ °C}$ . L'oscillazione è dovuta alla ventilazione perché la stratigrafia dell'aria non è costante se l'impianto è acceso; si evolve. Con impianto spento l'aria è "ferma" e di conseguenza la stratigrafia termica dell'aria anche. In questo caso le condizioni esterne influiscono sulla temperatura, infatti la Temperatura media del giorno del rilievo era di circa  $27 \text{ °C}$ .

## ***CAPITOLO 8. ANALISI DI RISCHIO***

In questa parte del lavoro è fondamentale che i dati raccolti siano attendibili e reali perché è da questi che il mio lavoro di sperimentazione dirà se il tutto funziona o meno. I dati riportati, di conseguenza, sono reali, perché derivano dal monitoraggio o derivanti da calcoli accurati.

Mettendo a confronto i dati degli studi sperimentali con quelli ottenuti ad impianto spento/acceso, possiamo stabilire un certo grado di rischio di trasmissione possibile da COVID-19.

### ***8.1. Rischio legato all'umidità relativa***

L'umidità relativa, come ho già detto, è fondamentale per l'evaporazione o meno delle goccioline stabilendo il tempo di permanenza in aria del virus dopo un colpo di tosse ad esempio. I diversi studi visti nel capitolo 3.1 ci forniscono le diverse soglie di umidità relativa al fine di scongiurare anche il minimo grado di rischio. La soglia, sulla quale tutti gli studi convergono, è del 40-43%; pertanto umidità relative più basse o uguali rispetto a questa soglia aumentano il rischio di trasmissione da parte delle particelle virali sospese in aria. Nella tabella seguente sono evidenziati i valori minimi di UR sia con impianto spento che acceso.

<b>IMPIANTO SPENTO</b>	<b>42.87%</b>
<b>IMPIANTO ACCESO</b>	<b>61.33%</b>

Il valore minimo registrato ad impianto spento è inferiore alla soglia del 43%, anche se di poco perché si parla di decimi, ma ciò non lo esime da essere considerato come valore a rischio di trasmissione. Il valore inferiore al 43% lo si è raggiunto una sola volta durante tutto il rilievo, mentre la massima registrata è stata pari a 46.52%, che non è molto lontana dal valore di soglia e ciò non esclude che il rischio ci sia, anche se basso. Con valori simili (ovvero < 50%) si viene a creare anche una situazione di discomfort termoigrometrico per gli occupanti.

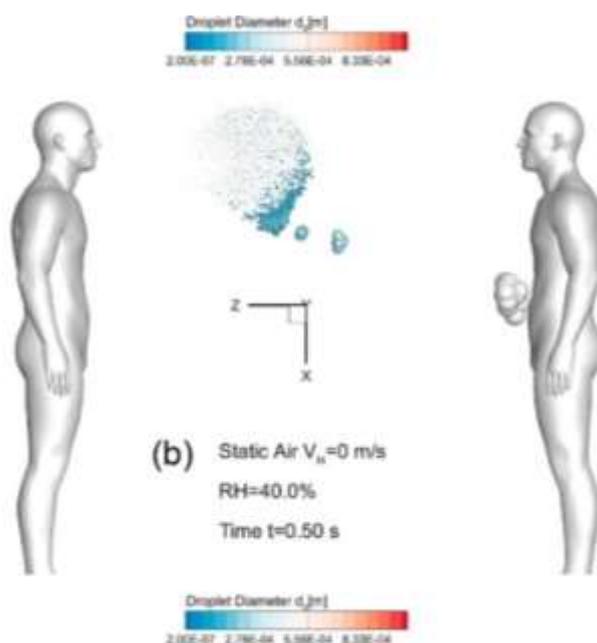
Con impianto acceso siamo nella situazione ideale di umidità relativa, ovvero, sempre secondo gli studi il rischio è nullo.

## 8.2. Rischio legato alla velocità dell'aria

Lo studio a cui si è fatto riferimento mette a confronto due situazioni con velocità dell'aria uguali ma con UR diverse. Tra questi due casi vi è uno molto simile (Fig. 38) alle nostre condizioni con impianto spento, ovvero:

- $V=0$  m/s.
- UR=40%.

Si assume  $v=0$  perché parliamo di velocità molto molto basse, vicine allo 0.



(Fig. 38) Situazione ad impianto spento

La percentuale delle particelle piccole è maggiore rispetto alle particelle più grandi, da ciò si deduce che la velocità combinata con UR produce un rischio di trasmissione perché, essendo l'aria ferma, la convezione comunque trascina le particelle più piccole; allo stesso tempo questa velocità di convezione è bassa per far allontanare le particelle virali dal soggetto sano.

Nel caso di impianto acceso la combinazione velocità e UR fa sì che ci siano meno particelle piccole in aria, perché abbiamo UR che ne diminuiscono le quantità, ed essendo per la maggior parte particelle simili ai droplet, non saranno trasportate oltre i 2 metri in quanto la ventilazione in media è intorno ai 0.2 m/s. Solo nelle sedute tra i due canali d'immissione dove si verificano i due vortici, si raggiungono velocità superiori ai 0.25 m/s. Superiori a questa soglia, le velocità iniziano a trasportare anche le particelle più grandi, i droplet e quindi c'è un rischio limitato di trasmissione dovuto a queste particelle perché a differenza dell'aerosol restano per poco tempo in aria essendo più pesanti.

In sintesi, nella situazione ad impianto spento la velocità correlata all'umidità relativa fa sì che aumenti il grado di rischio. Con impianto acceso c'è una situazione di rischio legata ai droplet nella zona centrale dell'aula a causa dei due vortici. Nel secondo caso il rischio possiamo dire che è puntuale e limitato rispetto al caso con impianto spento.

### ***8.3. Rischio legato alla temperatura***

Anche per la temperatura, così come per la velocità, si fa riferimento all'umidità relativa, anche perché esse sono strettamente legate: sicuramente in un clima freddo si ha un'aria secca, umidità relativa bassa, mentre in un clima caldo un'aria umida con umidità relativa alta. Il clima freddo e secco, come detto nel capitolo 3.3, causa l'aumento di rischio per le persone di potersi infettare con malattie virali.

Le sperimentazioni inerenti alla temperatura legati a SarsCoV-2 sono tutt'ora oggetto di studio; una cosa è certa: il SarsCoV-2 ha un comportamento analogo a MersCoV per il quale sono state svolte le sperimentazioni in termini di temperatura-umidità.

Ad impianto spento l'umidità relativa è al limite della soglia massima 43%, mentre, la temperatura è in media intorno ai 25,5 °C. Dagli studi si è venuto a conoscenza che ad alte temperature e alte umidità (30°C – 60%) il virus, studiato in goccioline, è rimasto vitale molto meno rispetto a situazioni di basse temperature e basse umidità (20°C – 40%).

Per quanto riguarda l'aerosol lo studio ci dice che a basse temperature e basse umidità (20°C – 40%) la vitalità del virus, rispetto alle goccioline, è diminuito solo del 7%. Prendendo i dati di temperatura e umidità nel caso di impianto spento e confrontandoli con questi risultati, la situazione è lampante: c'è un aumento di rischio di trasmissione.

Nella situazione di impianto acceso anche se la temperatura è simile al caso di impianto spento, ovvero 26,5 °C di media, ciò che realmente fa la differenza è l'umidità relativa, ben oltre il 60,5 % di media. Lo stesso studio dell'aerosol fatto a 20 °C e 40% di umidità relativa è stato eseguito anche con temperatura di 20 °C ma con 70% di umidità relativa. Il risultato è stato chiaro: la vitalità del virus a 70% di UR si riduce dell'89%. Il rischio di trasmissione si riduce enormemente con impianto acceso.

#### ***8.4. Rischio legato alla portata***

In base ai dati inerenti del nostro caso di studio dobbiamo assicurare una portata di **28 m<sup>3</sup>/h** a persona così come impone la UNI 10339. La norma DIN 1946-6 impone invece **30 m<sup>3</sup>/h** a persona.

Facendo rapidamente un calcolo, per quanto riguarda lo studio dell'aula B, con 2400 m<sup>3</sup>/h, con impianto acceso, le normative sono verificate con una capienza di: 80 persone. Con impianto spento, questi valori sarebbero inaccessibili.

Il rischio legato alla portata può essere calcolato sperimentalmente con l'equazione di Buonanno trattata al capitolo 1.3; in questo lavoro si è deciso di utilizzare l'app dell'Airborne che è in grado di calcolare la percentuale di rischio di trasmissione individuale secondo la variazione di alcuni dei parametri fondamentali come l'occupazione, la portata e anche in base al fatto che gli occupanti potrebbero o meno indossare la mascherina. Bisogna inserire anche parametri fissi come l'area e l'altezza della stanza più il numero delle persone infette all'interno dell'aula con il tempo d'occupazione delle stesse all'interno dell'ambiente.

Il passo successivo è mettere a confronto come il rischio cambi a seconda dell'occupazione e della portata, andando a graficare lo stesso con i tre livelli di occupazione:

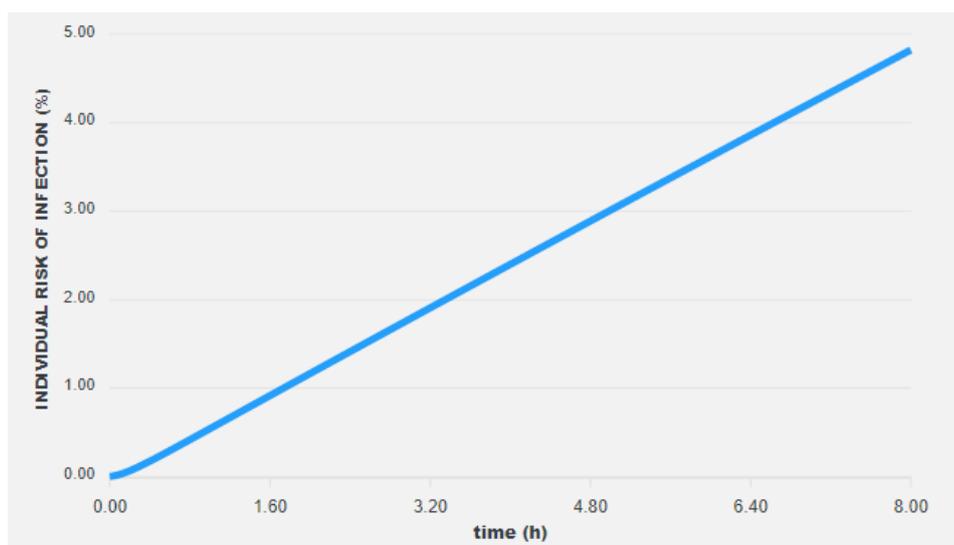
- 80 persone;
- 180 persone;
- 350 persone.

### **Occupazione 80 persone**

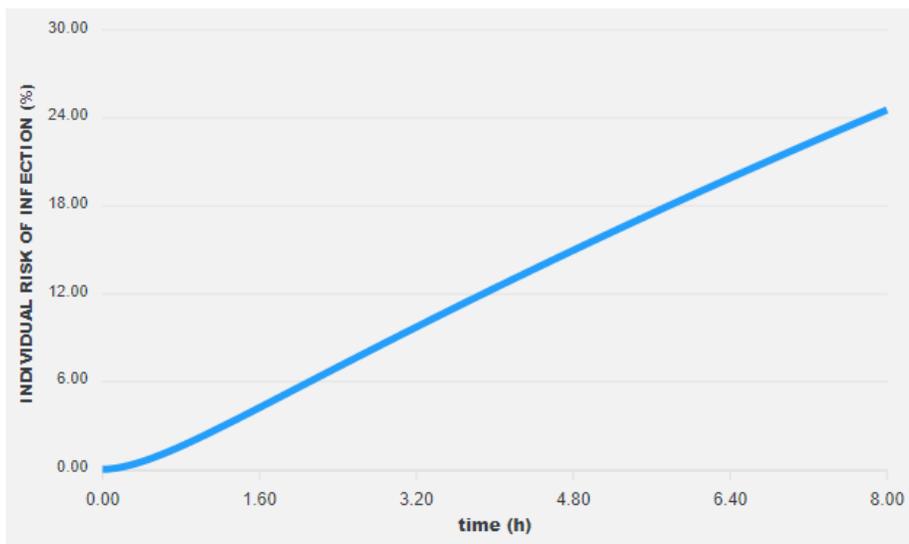
Di seguito studiamo il confronto del rischio con 80 persone (massima capienza per garantire le portate delle normative) con impianto acceso (*Fig. 39*) e impianto spento (*Fig. 40*) in relazione al tempo di occupazione che si è scelto di tenere fisso e impostato ad 8 ore.

Un parametro fondamentale è l'altezza della stanza che si posta pari a 4,7 metri, ovvero la media tra l'altezza maggiore 5,5 m e quella minore 3,9 m.

Un'altra scelta che si è fatta, è stata di decidere il numero delle persone infette all'interno dell'aula; per tutte le prove effettuate c'è una sola persona infetta dentro l'aula.



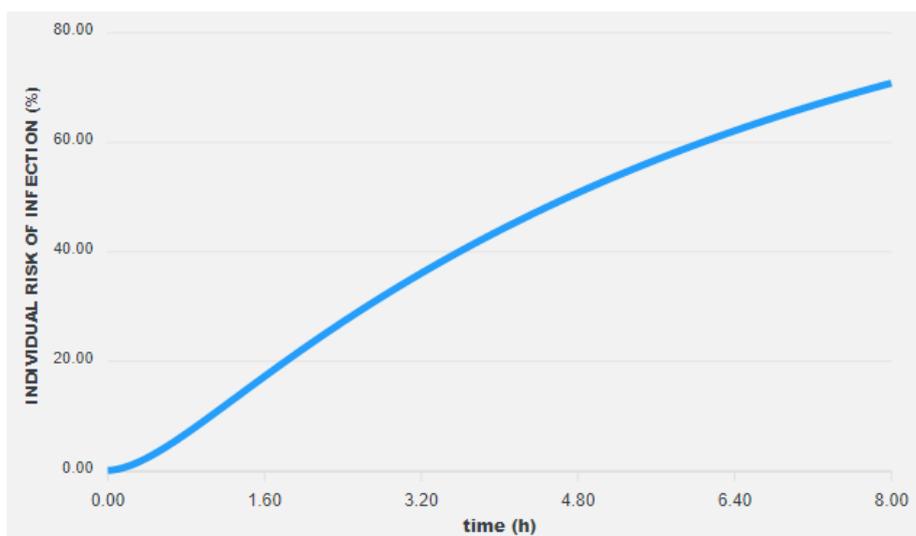
(Fig. 39) Rischio con impianto acceso 80 persone



(Fig. 40) Rischio con impianto spento con 80 persone

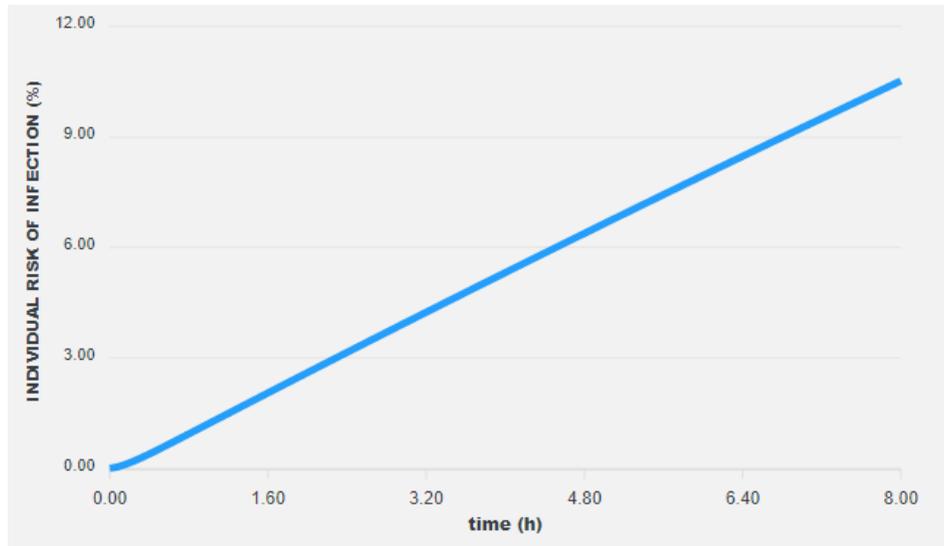
I grafici parlano chiaro e non fanno altro che confermare ciò che si era analizzato mettendo a confronto l'umidità relativa, velocità e temperatura dei rilievi tramite la stazione; ovvero che la ventilazione con impianto RTD acceso diminuisce il rischio di trasmissione. Con impianto acceso dopo 8 ore il rischio sale fino al 5% mentre il rischio arriva al 24% dopo 8 ore con impianto spento.

Con la massima capienza, ovvero 350 persone il rischio è veramente altissimo (Fig. 41). Si arriva al 70 % di rischio individuale di contagio.

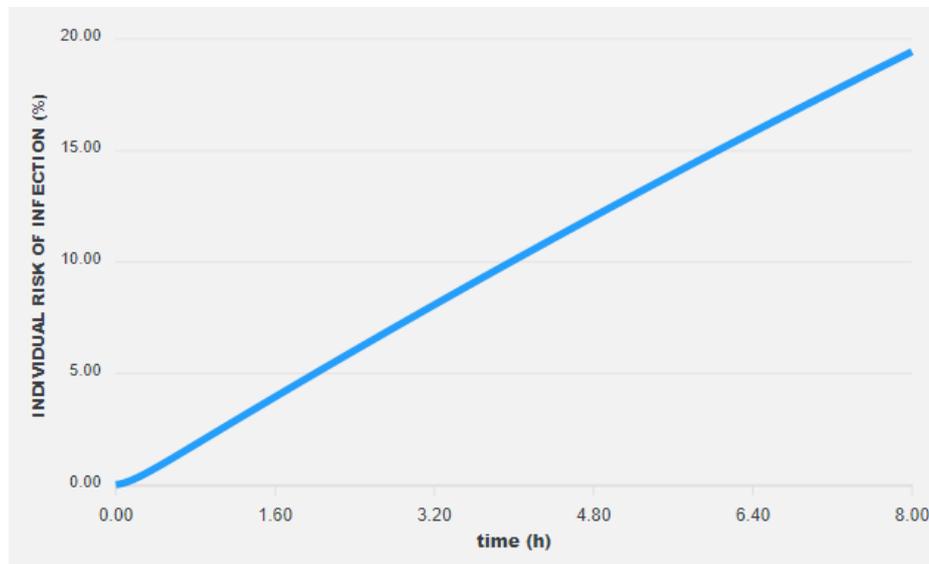


(Fig. 41) Rischio con impianto spento occupazione 350 persone

Assodato che il rischio diminuisce con la ventilazione accesa, vediamo come il numero di occupazione ad impianto acceso varia la percentuale di rischio. Con occupazione ad 80 persone facciamo riferimento alla figura 39, mentre per 180 e 350 alle (Fig. 42) e (Fig. 43).



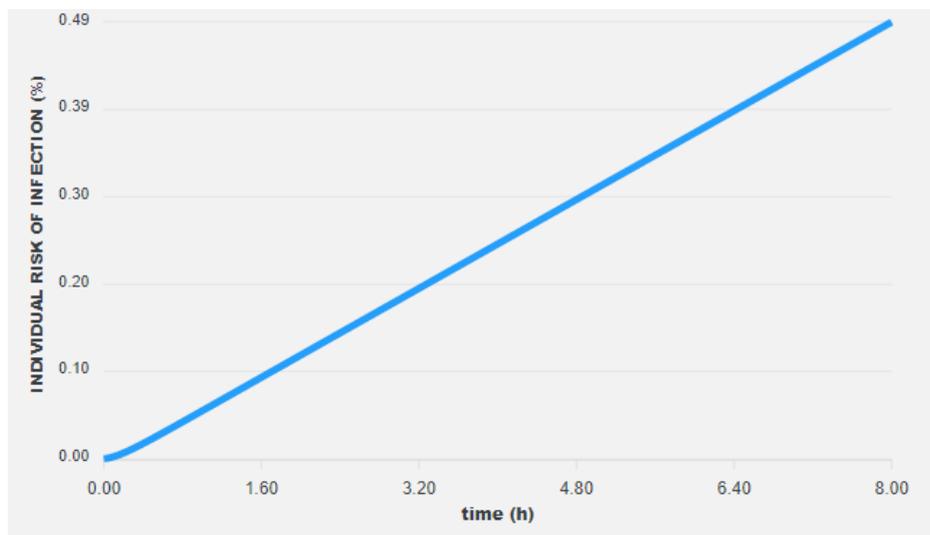
(Fig. 42) Rischio con impianto acceso con occupazione 180 persone



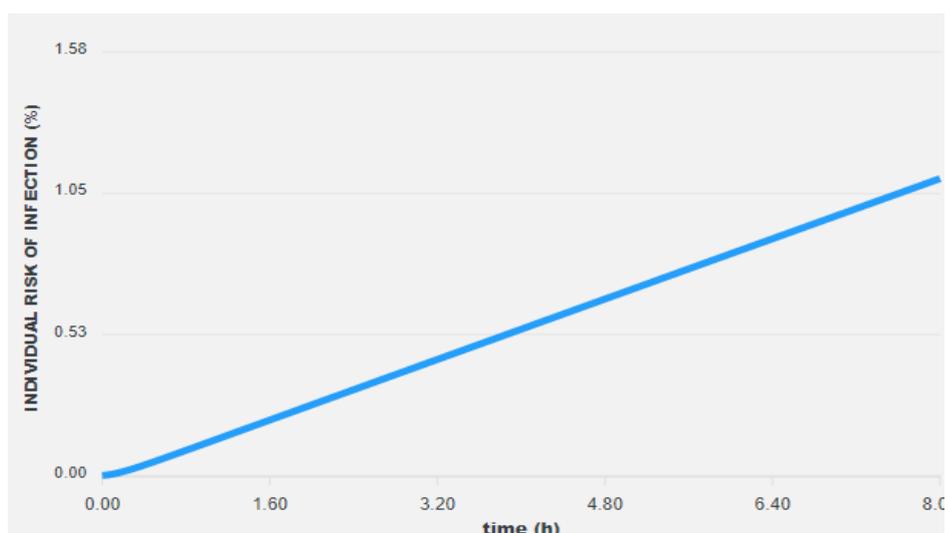
(Fig. 43) Rischio con impianto acceso con occupazione 350 persone

Analizzando i grafici, come da aspettativa, il rischio aumenta all'aumentare dell'occupazione partendo dal 5% con 80 persone, passando al 10% con 180 occupanti sino ad arrivare al 20% con massima capienza, ovvero 350 persone.

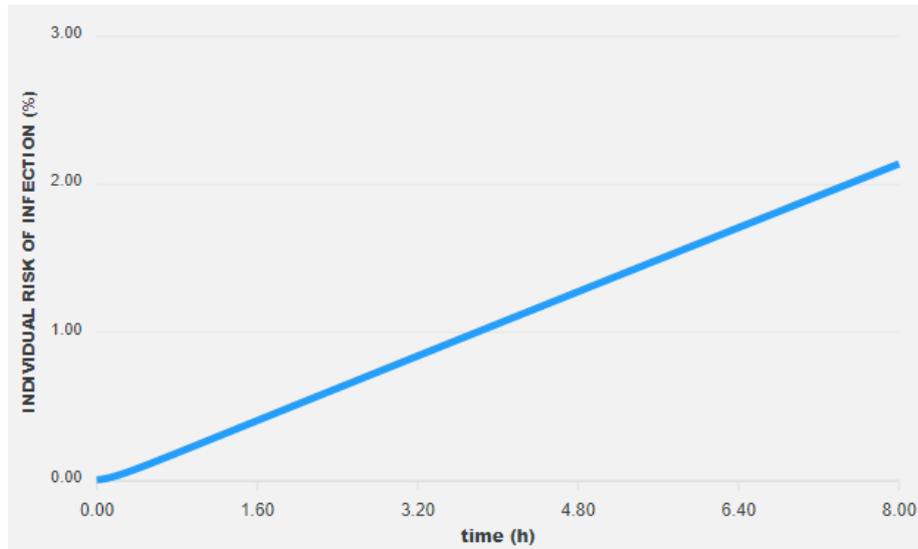
Evidente è come la ventilazione riduca la trasmissione da COVID-19 in un ambiente chiuso. Però da sola, non è in grado di eliminare, o per lo meno, abbassare il rischio di contagio sino a soglie molto vicine allo 0%. Le prove con l'app Airborne ci permettono di effettuare il calcolo del rischio andando ad inserire se gli occupanti indossano una mascherina e quale tra quella chirurgica, FFP2 ecc. Si è provato a svolgere lo stesso esperimento, ovvero impianto acceso e numero di occupazione variabile, con aggiunta della mascherina FFP2/N95, una delle migliori, se non la migliore, per contrastare il contagio da COVID-19. I risultati sono eclatanti.



(Fig. 44) Rischio con impianto acceso con occupazione 80 persone con mascherina FFP2



(Fig. 45) Rischio con impianto acceso con occupazione 180 persone con mascherina FFP2



(Fig. 46) *Rischio con impianto acceso con occupazione 350 persone con mascherina FFP2*

I risultati come detto, sono eclatanti. Parliamo di percentuali bassissime per occupazione massima, poco più del 2% dopo 8 ore, ciò vuol dire occupanti vicini a meno di sei piedi di distanza tra loro per otto ore consecutive. Per 80 persone la percentuale e quindi il rischio è quasi nullo: 0.49%. Il doppio l'1% per 180 persone. L'accoppiamento tra la ventilazione e l'uso della mascherina FFP2/N95 sicuramente funziona e riduce al minimo il rischio di contagio anche con capienza massima dell'aula. Nell'aula vi è la presenza anche di un impianto preesistente accoppiato ad una UTA ma non è stato preso in considerazione perché spento in entrambi i rilievi.

### **8.5. Rischio legato alla CO<sub>2</sub>**

Questo parametro, se pur fondamentale per il rischio di contagio, non è stato preso in considerazione perché sarebbe stato poco attendibile in quanto, l'aula, durante i rilievi era vuota e quindi il valore registrato non sarebbe stato veritiero perché è strettamente legato al numero di occupanti; più occupanti ci sono e più aumenta il valore dell'inquinante. Però è giusto inserire la soglia massima del livello di inquinante oltre il quale il rischio di contagio aumenta. Va detto che in base al tipo di luogo vi sono valori diversi. Una biblioteca, dove l'uso della mascherina è obbligatoria, può avere valori maggiori di ppm rispetto ad una palestra attiva, dove non tutti indossano la mascherina, e ottenere percentuali di rischio di trasmissione minori [53]. Per un'aula universitaria i valori non devono superare i **700 ppm**.

## ***CAPITOLO 9. CONCLUSIONI***

I progettisti degli edifici e i funzionari governativi svolgono un ruolo estremamente importante nel ridurre la trasmissione virale di queste malattie mortali, come SARS-CoV-2, emanando linee guida e standard per contrastarla. I governi di tutto il mondo hanno già fissato alcuni standard di qualità dell'aria interna per la temperatura e gli inquinanti interni, ma non esistono normative e politiche in tutto il mondo che richiedono uno standard minimo di umidità relativa negli edifici pubblici e negli ambienti interni. Sulla base dei risultati della ricerca, per scenari futuri, l'impostazione di uno standard minimo di umidità relativa del 40% – 43% per gli edifici pubblici non solo ridurrà l'impatto di COVID-19, ma ridurrà anche l'impatto di ulteriori epidemie virali, sia stagionali che nuove. Sebbene non sia un compito facile prevedere le epidemie di infezioni virali, raccogliere informazioni sufficienti su come si diffondono queste infezioni virali e sviluppare di conseguenza piani di contrasto, ci impedirà sicuramente di affrontare una pandemia su larga scala come la SARS-CoV-2.

Per i paesi con climi più freddi, è necessario tenere in considerazione lo standard minimo di umidità relativa per gli ambienti interni. Mentre, per i paesi caldi e tropicali, dove l'umidità relativa è alta, sono raccomandate misure di controllo dell'umidità evitando il raffreddamento estremo dei luoghi interni. Sebbene la vitalità del virus non sarà ridotta al minimo ad alta umidità relativa, la grande dimensione delle goccioline assicurerà che la dispersione nell'aria sia quasi nulla. In generale, si consiglia l'umidificazione dell'aria. Al fine di frenare le epidemie, dobbiamo concentrarci sul ruolo dell'aria interna, sulla trasmissione della malattia e sulla salute dei residenti. Altre precauzioni oltre all'ottimizzazione dell'umidità relativa sono aumentare le ventilazioni naturali come l'apertura delle finestre durante la permanenza al chiuso, e lì dove essa non garantisce le portate richieste dalle normative installare un impianto di ventilazione meccanica controllata che insieme all'uso di maschere facciali adeguate riduce al minimo il rischio di contagio da Sars-Cov-2. Per attuare le linee guida sopra menzionate, abbiamo bisogno di un piano concreto che metta d'accordo le diverse comunità come medici professionisti, responsabili politici, pianificatori e funzionari governativi.

## ***BIBLIOGRAFIA***

- [1]. Sahin, epidemia di nuovo coronavirus (COVID-19) AR 2019: una revisione della letteratura attuale. *Eurasiatico J. Med. Oncol* (2020).
- [2]. Van Doremalen, N. Bushmaker, T.; Morris, DH ; Holbrook, MG ; Giocò d'azzardo, A. ; Williamson, BN ; Tamin, A. ; Harcourt, JL ; Thornburg, New Jersey ; Gerber, SI ; Lloyd Smith, JO ; de Wit, E. ; Munster, VJ Aerosol e stabilità superficiale di SARS-CoV-2 rispetto a SARS-CoV-1 (2020).
- [3]. Fare luce sul COVID-19. *Naz. Fotonica* (2020).
- [4]. Garcia de Abajo, FJ ; Hernández, RJ ; Kaminer, I. ; Meyerhans, A. ; Rosell-Llompart, J. ; Sanchez-Elsner, T. Ritorno alla normalità: un vecchio percorso di fisica per ridurre la trasmissione di SARS-CoV-2 negli spazi interni (2020).
- [5]. Morawska, L. ; Cao, J. Trasmissione aerea di SARS-CoV-2: il mondo dovrebbe affrontare la realtà. (2020).
- [6]. SL Miller e altri, *Aria Interna*, (2020).
- [7]. KA Prather, CC Wang, RT Schooley, *Scienza*, 1422 (2020).
- [8]. V. Stadnytskyi, CE Bax , A. Bax ,P. Anfinrud, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* (2020).
- [9]. J. Ma e altri, *Clin. Infettare. Dis.* (2020).
- [10]. Brown J., Tang J., Pankhurst L., Klein N., Gant V., Lai K. Sopravvivenza del virus dell'influenza negli aerosol e stime della perdita di virus vitale derivante dall'aerosol e dal campionamento dell'aria. *J. Hosp. Infettare.* (2015).
- [11]. Kim S.-H., Chang SY, Sung M., Park JH, Bin Kim H., Lee H. Contaminazione da coronavirus della sindrome respiratoria mediorientale estesa e praticabile (MERS) nell'aria e nell'ambiente circostante nei reparti di isolamento MERS. *Rev. Infetto. Dis.* (2016).

- [12]. Marr LC, Tang JW, Van Mullekom J., Lakdawala SS Approfondimenti meccanicistici sull'effetto dell'umidità sulla sopravvivenza, trasmissione e incidenza del virus dell'influenza nell'aria. *JR Soc. Interfaccia*. (2019).
- [13]. Johnson GR, Morawska L., Ristovski ZD, Hargreaves M., Mengersen K., Chao CYH, Wan MP, Li Y., Xie X., Katoshevski D., Corbett S. Modalità delle distribuzioni delle dimensioni dell'aerosol umano scaduto. *J. Aerosol Sci.* (2011).
- [14]. Duguid JP I numeri e i siti di origine delle goccioline espulse durante l'attività espiratoria Edimburgo *Med. J. LII*. (1945).
- [15]. Papineni RS, Rosenthal FS La distribuzione dimensionale delle goccioline nel respiro espirato di soggetti umani sani. *J. Aerosol Med.* (1997).
- [16]. Gammaitoni L., Nucci MC Utilizzo di un modello matematico per valutare l'efficacia delle misure di controllo della TB. *Emerg. Infettare. Dis.* (1997).
- [17]. Morawska L., Johnson GR, Ristovski ZD, Hargreaves M., Mengersen K., Corbett S., Chao CYH, Li Y., Katoshevski D. Distribuzione dimensionale e siti di origine delle goccioline espulse dal tratto respiratorio umano durante le attività espiratorie. *J. Aerosol Sci.* (2009).
- [18]. Yang W., Marr LC Dynamics of Airborne Influenza A Viruses Indoor e Dipendenza dall'Umidità. *PLoS UNO*. (2011).
- [19]. Chatoutsidou SE, Lazaridis M. Valutazione dell'impatto della deposizione secca di particolato sullo sporco di oggetti del patrimonio culturale indoor trovati in chiese e musei/biblioteche. *J. Culto. Eredità*. (2019).
- [20]. Riley C., Murphy G., Riley RL Diffusione aerea del morbillo in una scuola elementare suburbana. *Sono. J. Epidemiol.* (1978).
- [21]. ISO, B. 17772-1: 2017. Prestazione energetica degli edifici. Qualità ambientale interna. Parametri di input ambientale indoor per la progettazione e la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici.

- [22]. Gilkeson C., Camargo-Valero M., Pickin L., Noakes C. Misurazione della ventilazione e del rischio di infezione per via aerea nei grandi reparti ospedalieri ventilati naturalmente. *Costruire ambiente*. (2013).
- [23]. OMS, 2020a. Prevenzione e controllo delle infezioni durante l'assistenza sanitaria quando si sospetta COVID-19. Guida provvisoria. Organizzazione Mondiale della Sanità, 19 marzo 2020.
- [24]. Sornboot J., Aekplakorn W., Ramasoota P., Bualert S., Tumwasorn S., Jiamjarasrangsi W. Rilevamento del complesso di tubercolosi di *Mycobacterium* trasportato dall'aria in aree ad alto rischio di strutture sanitarie in Thailandia. *Int. J. Tuberc. Polmone Dis.* (2019).
- [25]. ASHRAE, 2020b. Documento di posizione sulle malattie infettive trasmesse dall'aria, approvato dal consiglio di amministrazione, 19 gennaio 2014. Riaffermato dal Technology Council, 5 febbraio 2020. Atlanta, Georgia.
- [26]. Knibbs LD, Morawska L., Bell SC Il rischio di trasmissione dell'influenza per via aerea nelle autovetture. *Epidemiolo. Infettare.* (2012).
- [27]. ASHRAE, 2017. ASHRAE Standard 52.2-2017 Metodo di prova dei dispositivi di pulizia dell'aria a ventilazione generale per l'efficienza di rimozione in base alla dimensione delle particelle.
- [28]. David J. Brenner, direttore presso il Center for Radiological Research dell'Università Columbia di New York.
- [29]. Walker CM, Ko G. Effetto dell'irradiazione germicida ultravioletta sugli aerosol virali. *Ambiente. Sci. Tecnol.* (2007).
- [30]. Xu P., Peccia J., Fabian P., Martyny JW, Fennelly KP, Hernandez M. Efficacia dell'irradiazione germicida ultravioletta dell'aria dei locali superiori nell'inattivazione di spore batteriche e micobatteri nell'aria in studi su vasta scala. *atmosfera ambiente.* (2003).

- [31]. McDevitt JJ, Rudnick SN, Radonovich LJ Suscettibilità agli aerosol del virus dell'influenza alla luce UV-C. *Appl. ambiente. Microbiolo.* (2012).
- [32]. Xu P., Kujundzic E., Peccia J., Schafer MP, Moss G., Hernandez M. Impatto dei fattori ambientali sull'efficacia dell'irradiazione germicida ultravioletta dell'aria superiore per l'inattivazione dei micobatteri nell'aria. *ambiente. Sci. Tecnol.* (2005).
- [33]. Darnell ME, Subbarao K., Feinstone SM, Taylor DR Inattivazione del coronavirus che induce la sindrome respiratoria acuta grave SARS-CoV.
- [34]. McLean R. Il meccanismo di diffusione dell'influenza asiatica: discussione generale. *Sono. Rev. Respiro. Dis.* (1961).
- [35]. Noakes CJ, Khan MAI, Gilkeson CA Modellazione del rischio di infezione e dell'uso di energia dei sistemi di irradiazione germicida ultravioletta nei locali superiori in ambienti multi-room. *Sci. Tecnol. Ambiente costruito.* (2015).
- [36]. Escombe AR, Moore DA, Gilman RH, Navincopa M., Ticona E., Mitchell B. Luce ultravioletta da camera superiore e ionizzazione dell'aria negativa per prevenire la trasmissione della tubercolosi. *PLoS Med.* (2009).
- [37]. Gilkeson CA, Noakes C. Applicazione della simulazione CFD per prevedere l'efficacia UVGI della stanza superiore. *Fotochimica. Fotobiolo.* (2013).
- [38]. Noakes C., Beggs C., Sleight P. Modellazione delle prestazioni dei dispositivi di irradiazione germicida ultravioletta della camera superiore in ambienti ventilati: confronto tra metodi analitici e CFD. *Ambiente costruito al coperto.* (2004).
- [39]. Feng, Y., Marchal, T., Sperry, T. and Yi. Influenza del vento e dell'umidità relativa sull'efficacia del distanziamento sociale per prevenire la trasmissione aerea di COVID-19 (2020).

- [40]. Marr, L.C., Tang, J.W., Van Mullekom, J. and Lakdawala, S.S. Approfondimenti meccanicistici sull'effetto dell'umidità sulla sopravvivenza, trasmissione e incidenza del virus dell'influenza nell'aria (2019).
- [41]. Lin, K. and Marr, L.C. Il decadimento dipendente dall'umidità dei virus, ma non dei batteri, negli aerosol e nelle goccioline segue la cinetica di disinfezione. (2020).
- [42]. Chan, K.H., Malik Peiris, J.S., Lam, S.Y., Poon, L.L.M., Yuen, K.Y. and Seto, W.H. Gli effetti della temperatura e dell'umidità relativa sulla vitalità del coronavirus SARS-COV1. (2011).
- [43]. Condaire Ltd. *Healthy air humidity*. L'importanza dell'umidificazione dell'aria negli ospedali e negli ambulatori. (2007).
- [44]. Taylor, S. Perché la lotta contro il COVID-19 deve includere l'umidità dell'aria interna (2020).
- [45]. Yao, M., Zhang, L., Ma, J. and Zhou, L. Sulla trasmissione aerea e il controllo di SARS-Cov-2 (2020).
- [46]. Bashir, M.F., Ma, B., Bilal., Komal, B., Bashir, M.A., Tan, D. and Bashir, M. Correlazione tra indicatori climatici e pandemia di COVID-19 a New York, USA. (2020).
- [47]. Pani, S.K., Lin, N.H. and RavindraBabu, S. Associazione della pandemia di COVID-19 con i parametri meteorologici su Singapore. (2020).
- [48]. Huang, Z., Huang, J., Gu, Q., Du, P., Liang, H. and Dong, Q. Zona di temperatura ottimale per lo smaltimento del COVID-19. (2020).
- [49]. C.Chen, B.Zhao. Alcune domande sulla dispersione delle goccioline espirate umane nella stanza di ventilazione: risposte dall'indagine numerica. (2010).

[50]. Puzelli S, Azzi A, Santini MG, Di Martino A, Facchini M, Castrucci MR, et al. Indagine su un caso importato di infezione da sindrome respiratoria mediorientale da Coronavirus (MERS-CoV) a Firenze, Italia. (2013).

[51]. Steel J, Palese P, Lowen AC. La trasmissione di un virus dell'influenza pandemica del 2009 mostra una sensibilità alla temperatura e all'umidità simile a quella di un ceppo stagionale H3N2. (2011).

[52]. Chan KH, Peiris JS, Lam SY, Poon LL, Yuen KY, Seto WH. Gli effetti della temperatura e dell'umidità relativa sulla vitalità del coronavirus SARS. (2011).

[53]. Zhe Peng, Jose L. Jimenez. CO2 esalata come proxy del rischio di infezione da COVID-19 per diversi ambienti interni e attività. Lettere di scienza e tecnologia ambientale, (2021).

## ***RINGRAZIAMENTI***

Alla mia famiglia.

Ai miei amici.

A Eleonora.

A me.