



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA EDILE

Corso di Laurea Magistrale

**ANALISI SPERIMENTALE DELLA VENTILAZIONE NELLE
AULE PER RIDURRE IL RISCHIO COVID**

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF VENTILATION IN
SCHOOLROOMS TO REDUCE COVID RISK**

Relatore:

Chiar.mo Prof. Costanzo Di Perna

Correlatore:

Dott. Ing. Luca Tarabelli

Tesi di Laurea di:

Massimo Latini

A.A. 2020/2021

ABSTRACT:

Il presente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di valutare sperimentalmente metodologie atte a ridurre il rischio derivante dal contagio da SARS-CoV-2 nelle aule universitarie, prendendo in esame prove sperimentali, considerando studi e poi traendo le opportune conclusioni.

L'argomento oggetto di studio è interessante per via della sua attualità e per la molteplicità degli aspetti che ne derivano anche in campo impiantistico.

La pandemia dovuta al SARS-Cov-2 non soltanto ha cambiato diversi aspetti della nostra vita quotidiana ma anche la concezione riguardante la progettazione degli impianti aeraulici. Quest'ultima deve inevitabilmente tener conto di nuovi aspetti progettuali, sostenuti da evidenze sperimentali che riescano a coniugare sicurezza sul luogo di studio/lavoro con il comfort degli ambienti interni.

L'Indoor Air Quality all'interno di questi ambienti dovrà essere garantita, avendo come obiettivo la riduzione significativa di agenti patogeni, perniciosi sul piano della salute personale.

Nella prima parte si farà riferimento allo stato dell'arte, per avere una panoramica degli studi sul rischio Covid, porgendo l'attenzione all'obiettivo finale della stima della probabilità di contagio da SARS-Cov-2 e di trarre delle considerazioni sulla ripresa delle attività didattiche in presenza a settembre.

Le considerazioni fatte in merito ad accorgimenti di progettazione, pongono il loro fine nello sviluppare una conoscenza in merito ai rischi di contagio.

Successivamente verrà preso in considerazione un caso di studio, l'aula S3 di Scienze. Verrà descritto l'impianto preesistente e l'impianto aggiunto a posteriori. Si noterà, come la ventilazione fornita dai recuperatori termodinamici riesca in concreto a mitigare il rischio Covid all'interno del caso di studio.

Verranno considerate inoltre le formule al fine di stimare la probabilità di contagio derivante dalla concentrazione di cariche virali.

Si valuteranno quindi diversi scenari per mostrare come, variazioni di parametri, quali: tempo di permanenza, utilizzo delle mascherine e ricambi d'aria possano in concreto ridurre il rischio Covid.

INDICE

| | | |
|---------|--|----|
| 2. | Stato dell'arte..... | 13 |
| 2.1 | Studi sperimentali..... | 13 |
| 2.2 | Fatti accaduti e prospettive per valutazioni predittive | 15 |
| 2.2.1 | Valutazione del rischio di contagio | 18 |
| 2.2.1.1 | Valutazione del tasso di emissione ER_q | 18 |
| 2.2.1.2 | Valutazione della concentrazione di quanta all'interno di un ambiente 19 | |
| 2.2.1.3 | Valutazione delle dosi infettanti inalate | 20 |
| 2.2.1.4 | Probabilità di contagio..... | 21 |
| 2.3 | Ventilazione: comfort, iaq e rischio di contagio | 22 |
| 3 | Caso di studio..... | 28 |
| 3.1 | Rilievo dell'aula | 28 |
| 3.2 | Descrizione dell'impianto | 31 |
| 3.2.1.1 | Impianto preesistente | 32 |
| 3.2.1.2 | Impianto di nuova costruzione | 33 |
| 3.2.1.3 | Misurazione delle pressioni statiche dei canali microforati | 38 |
| 3.2.1.4 | Differenze tra recuperatore statico e recuperatore termodinamico 40 | |
| 3.2.1.5 | Funzionamento dell'impianto in fase di raffrescamento | 43 |
| 3.2.1.6 | Acustica dell'impianto..... | 45 |
| 4 | Caso di studio..... | 47 |
| 4.1 | Monitoraggio dell'aula s3 | 47 |
| 4.1.1 | Temperatura di set-point e portata..... | 48 |
| 4.1.2 | Sensori per il monitoraggio | 49 |
| 5 | Risultati sperimentali | 52 |
| 5.1.1 | Monitoraggio con i recuperatori termodinamici accesi..... | 52 |
| 5.1.2 | Monitoraggio con i recuperatori termodinamici spenti | 54 |
| 5.1.3 | Confronto tra impianto acceso e impianto spento | 58 |
| 5.1.4 | Velocità dell'aria all'interno dell'aula S3 | 58 |

| | | |
|----------|--|----|
| 5.1.4.1 | Stazione 1 (v10) - velocità dell'aria | 59 |
| 5.1.4.2 | Stazione 1 (v60) - velocità dell'aria | 59 |
| 5.1.4.3 | Stazione 1 (v110) - velocità dell'aria | 60 |
| 5.1.4.4 | Stazione 2 (v10) - velocità dell'aria | 60 |
| 5.1.4.5 | Stazione 2 (v60) - velocità dell'aria | 61 |
| 5.1.4.6 | Stazione 2 (v110) - velocità dell'aria | 61 |
| 5.1.4.7 | Stazione 3 (v10) - velocità dell'aria | 62 |
| 5.1.4.8 | Stazione 3 (v60) - velocità dell'aria | 62 |
| 5.1.4.9 | Stazione 3 (v110) - velocità dell'aria | 63 |
| 5.1.4.10 | Stazione 4 (v10) - velocità dell'aria | 63 |
| 5.1.4.11 | Stazione 4 (v60) - velocità dell'aria | 64 |
| 5.1.4.12 | Stazione 4 (v110) - velocità dell'aria | 64 |
| 5.1.4.13 | Stazione 5 (v10) - velocità dell'aria | 65 |
| 5.1.4.14 | Stazione 5 (v60) - velocità dell'aria | 65 |
| 5.1.4.15 | Stazione 5 (v110) - velocità dell'aria | 66 |
| 5.1.4.16 | Stazione 6 (v10) - velocità dell'aria | 66 |
| 5.1.4.17 | Stazione 6 (v60) - velocità dell'aria | 67 |
| 5.1.4.18 | Stazione 6 (v110) - velocità dell'aria | 67 |
| 5.1.4.19 | Stazione 7 (v10) - velocità dell'aria | 68 |
| 5.1.4.20 | Stazione 7 (v60) - velocità dell'aria | 69 |
| 5.1.4.21 | Stazione 7 (v110) - velocità dell'aria | 69 |
| 5.1.4.22 | Stazione 8 (v10) - velocità dell'aria | 70 |
| 5.1.4.23 | Stazione 8 (v60) - velocità dell'aria | 70 |
| 5.1.4.24 | Stazione 8 (v110) - velocità dell'aria | 71 |
| 5.1.4.25 | Stazione 9 (v10) - velocità dell'aria | 71 |
| 5.1.4.26 | Stazione 9 (v60) - velocità dell'aria | 72 |
| 5.1.4.27 | Stazione 9 (v110) - velocità dell'aria | 72 |
| 5.1.5 | Distribuzione della velocità dell'aria..... | 73 |
| 5.1.5.1 | Distribuzione della velocità dell'aria v10 (impianto acceso) | 74 |
| 5.1.5.2 | Distribuzione della velocità dell'aria v10 (impianto spento) | 75 |
| 5.1.5.3 | Distribuzione della velocità dell'aria v60 (impianto acceso) | 75 |
| 5.1.5.4 | Distribuzione della velocità dell'aria v60 (impianto spento) | 76 |

| | | |
|---------|--|----|
| 5.1.5.5 | Distribuzione della velocità dell'aria v110 (impianto acceso) | 76 |
| 5.1.5.6 | Distribuzione della velocità dell'aria v110 (impianto spento) | 77 |
| 5.1.5.7 | Considerazioni sulla distribuzione della velocità | 77 |
| 5.1.6 | Concentrazioni di anidride carbonica | 78 |
| 5.1.6.1 | Stazione 1 – Anidride carbonica..... | 78 |
| 5.1.6.2 | Stazione 2 - Anidride carbonica | 78 |
| 5.1.6.3 | Stazione 3 - Anidride carbonica | 79 |
| 5.1.6.4 | Stazione 4 - Anidride carbonica | 79 |
| 5.1.6.5 | Stazione 5 – Anidride carbonica..... | 80 |
| 5.1.6.6 | Stazione 6 – Anidride carbonica..... | 80 |
| 5.1.6.7 | Stazione 7 – Anidride carbonica..... | 81 |
| 5.1.6.8 | Stazione 8 – Anidride carbonica..... | 81 |
| 5.1.6.9 | Stazione 9 – Anidride carbonica..... | 82 |
| 5.1.7 | Distribuzione delle concentrazioni di CO ₂ | 83 |
| 5.1.7.1 | Concentrazioni di anidride carbonica (impianto acceso) | 84 |
| 5.1.7.2 | Concentrazioni di anidride carbonica (impianto spento)..... | 84 |
| 6 | Rischio di contagio | 85 |
| 6.1 | Obiettivi del calcolo | 85 |
| 6.2 | Calcolo della probabilità di contagio | 86 |
| 6.2.1 | Formula per il calcolo della concentrazione dei quanta all'interno dell'ambiente..... | 86 |
| 6.2.1.1 | Parametri per il calcolo della concentrazione dei quanta all'interno dell'ambiente | 86 |
| 6.2.2 | Calcolo della dose infettante | 89 |
| 6.2.3 | Calcolo della probabilità di contagio..... | 89 |
| 6.2.4 | Considerazioni sul tempo di permanenza e conseguenze sul rischio di contagio 90 | |
| 6.2.4.1 | Scenario 1, tempo di permanenza del soggetto infetto: un'ora | 91 |
| 6.2.4.2 | Scenario 2, tempo di permanenza del soggetto infetto: 4 ore..... | 92 |
| 6.2.5 | Probabilità di contagio ad impianto spento | 94 |
| 6.2.6 | Considerazioni sulla ripresa dell'attività didattica | 95 |
| 6.2.6.1 | Considerazioni su diversi scenari di permanenza..... | 96 |

| | | | |
|---|---------|--|-----|
| | 6.2.6.2 | Considerazioni sull'utilizzo della mascherina..... | 98 |
| 7 | | Conclusioni | 100 |

CAPITOLO 1:

1 INTRODUZIONE

Nella progettazione di ambienti interni bisogna tener presente come obiettivo primario il comfort indoor come anche descritto da Povl Ole Fanger. Parallelamente, si deve anche tener conto che la sicurezza negli ambienti di studio/lavoro è collegata ad una necessaria ventilazione.

Durante questo anno la pandemia da SARS-CoV-2 ha dimostrato come gli ambienti interni debbano essere progettati in modo innovativo, tenendo conto sia del comfort interno e sia di una riduzione del rischio di infezione da agenti patogeni per gli occupanti.

In tal senso la pandemia ci rende consapevoli che queste priorità di progettazione debbano essere all'ordine del giorno, sia in relazione alla nostra quotidianità e sia in relazione a probabili futuri virus. L'antropizzazione e lo sfruttamento della natura da parte dell'uomo potrebbero portare alla diffusione di nuovi virus.

L'esperienza con il "Nuovo Coronavirus" SARS-CoV-2 mostra come un agente patogeno può diffondersi in ambienti interni facilmente, durante un certo intervallo di permanenza.

Il SARS-CoV2- è un virus che può essere trasmesso mediante tre modalità (principali) e modalità aerogena (secondaria) che verrà illustrata successivamente.

- Contatto diretto o ravvicinato con una persona infetta
- Inalazione di goccioline prodotte mediante l'espiazione della persona infetta
- Contatto indiretto (mediante superfici contaminate)

Durante l'attività respiratoria di un soggetto positivo al nuovo coronavirus vengono emesse delle particelle di dimensioni variabili comprese in un range 0.01 – 2000 micron [1]

Le particelle con diametro maggiore sono definite “large droplets” [1]. Esse vengono generalmente emesse durante starnuti o colpi di tosse (diametro 200 – 2000 micron) e ricadono al suolo in poco tempo descrivendo traiettorie simili ad una parabola.

I medium droplets invece ricadono al suolo con la possibilità di evaporare. [1]

Le particelle più piccole, definite “small droplets”, possiedono un diametro generalmente compreso tra 0,5 micron e 50 micron; queste particelle possono evaporare.

Le particelle con diametro inferiore a 5 micron definiscono l’aerosol. Il problema connesso ad una eventuale formazione di Bioaerosol è strettamente connesso al tempo di permanenza all’interno di un ambiente chiuso.

Per quanto riguarda i virus influenzali le dimensioni delle goccioline infettanti dipendono da molteplici fattori, in particolar modo dall’umidità. [2]

Le goccioline (droplets), al momento dell’espiazione, possiedono circa il 100% di umidità relativa. Quando queste goccioline vengono emesse nell’ambiente si troveranno esposte in un ambiente che presenta un’umidità relativa più bassa e quindi subiranno una repentina evaporazione con conseguente diminuzione del loro volume e la successiva formazione di aerosol infetto.[2]

Il problema associato all’aerosol infetto è che può bypassare le misure di contenimento di contagio, inoltre le cariche virali all’interno di un aerosol potrebbero avere una capacità infettante fino a 16 ore. [3]

Il problema associato al virus SARS-CoV-2 è la sua elevata carica virale rispetto al virus SARS-CoV-1; inoltre si trasmette più facilmente in quanto si replica specialmente nelle vie aeree superiori, al contrario dell’altro virus. [4]

CAPITOLO 2:

2. STATO DELL'ARTE

Il presente studio sperimentale parte dalla documentazione su banche dati internazionali, di articoli in merito all'ambito dell'oggetto di studio, ponendo come obiettivo la comprensione delle dinamiche di infezione negli ambienti interni.

Gli studi allo stato dell'arte sono inseriti nel presente lavoro di Tesi, al fine di comprendere come possa variare il rischio di contagio all'interno degli ambienti indoor.

Per comprendere meglio dinamiche di infezione e i rischi reali negli ambienti, vengono citati anche fatti accaduti, come ad esempio nel ristorante di Guangzhou o nel coro di Skagit Valley.

2.1 STUDI SPERIMENTALI

Gammaitoni e Nucci [5] si sono posti l'obiettivo di quantificare mediante modelli matematici deterministici, l'efficacia di misure di riduzione del rischio da contagio aereo in relazione alla tubercolosi all'interno di nosocomi.

Sebbene questo studio prenda in esame il contagio da tubercolosi (causato da ceppi di micobatteri) può essere utilizzato anche per quantificare una possibile infezione da SARS-CoV-2.

Lo studio effettuato da Gammaitoni e Nucci deriva da due modelli matematici:

- Un modello sviluppato da Edward R. Riley et al. [6] che riguarda la probabilità di una persona suscettibile al rischio di contagio di infettarsi inalando dei quanta.
- Il secondo modello è stato sviluppato da William F. Wells [7] il quale ha introdotto la "Teoria dei quanta". I quanta sono i droplets nuclei necessari per infettare un determinato numero di individui. Un quantum o "quanta" viene definito come la dose infettante che è in grado di infettare il 63,2% di individui suscettibili. [5]

Pertanto i modelli per stimare il rischio di contagio, sono basati su modelli a dosi infettanti, considerando le dosi che verrebbero inalate da un soggetto sano all'interno di uno specifico ambiente, qualora vi fosse una concentrazione non nulla di cariche virali.

Nello specifico i modelli di Edward R. Riley e William F. Wells sono alla base di successivi studi, come quello di Nucci e Gammaitoni per comprendere come un'agente patogeno può diffondersi in un ambiente.

Il modello elaborato da Gammaitoni e Nucci [5] considera una distribuzione omogenea delle cariche virali all'interno di un determinato volume, che siano note le cariche virali emesse da un soggetto in un'ora e si considera la trasmissione indiretta per aerosol, non considerando invece le trasmissioni dirette collegate a tosse e starnuti.

Per ridurre la probabilità di contrarre l'infezione, occorre agire sulla ventilazione e abbassare tempi di permanenza; il che significa andare a ridurre la concentrazione di droplets nuclei, ovvero le particelle potenzialmente infette all'interno dell'ambiente.

Nello studio infatti è stato preso in esame il batterio della tubercolosi, le concentrazioni di infettante, sono state determinate in istanti di tempo, valutando diverse metodologie di mitigazione del rischio.

Con una ventilazione generica, filtrazioni HEPA, maschere chirurgiche, respiratori DMR e maschere HEPA, i rischi ovviamente si riducono all'interno di strutture nosocomiali, anche se, è impossibile rimuovere completamente agenti infettanti. [5]

Bisogna tener comunque presente che, sebbene si dovesse riuscire a ridurre il rischio, esso non sarà mai nullo; in quanto è impossibile rimuovere completamente eventuali agenti infettanti.

Sebbene lo studio di Gammaitoni e Nucci abbia preso in esame la diffusione del batterio della tubercolosi, esso è stato utilizzato come punto di riferimento per stimare il rischio di contagio da altri virus.

2.2 FATTI ACCADUTI E PROSPETTIVE PER VALUTAZIONI PREDITTIVE

Come già accennato precedentemente, il contagio aereo definisce una concreta probabilità di rischio, ma è difficile quantificarlo in quanto necessita di valutazioni predittive. Lo studio di G. Buonanno et al. [8], rappresenta un'innovazione, in quanto prende in considerazione sia valutazioni retrospettive su quanto accaduto in Cina a Guangzhou o nel Mount Vernon negli Stati Uniti d'America e sia valutazioni predittive per simulare scenari relativi al rischio di contagio aereo.

In Guangzhou come descritto in uno studio di Lu et al. [9] a Febbraio 2020, all'interno di un ristorante, sono state contagiate un totale di 10 persone, provenienti da tre diverse famiglie.

Il ristorante è un edificio di 5 piani, senza aperture, dove ciascun piano è dotato di un impianto indipendente di aria condizionata.

Un soggetto appartenente ad un nucleo familiare era positivo al SARS-CoV-2 ed asintomatico. Dopo il periodo di incubazione, anche diversi membri degli altri nuclei familiari che durante il pranzo si trovavano ai tavoli vicini, sono stati contagiati. Un possibile scenario, come descritto nello studio di Lu et al. [9], è che il soggetto già infetto, abbia infettato un membro degli altri nuclei familiari e che, a posteriori, gli stessi abbiano infettato anche gli altri membri delle rispettive famiglie.

La trasmissione del virus in questo caso, come anche descritto nello studio di Lu et al. [9] non può essere derivata soltanto dall'inalazione di droplets infetti. Le persone degli altri due nuclei familiari si trovavano ad una distanza maggiore di un metro dal soggetto infetto, quindi la distanza interpersonale era rispettata.

La via di contagio più accreditata è quella del contagio aereo, correlata alla scarsa ventilazione all'interno del ristorante, in sostanza, i soggetti sono rimasti esposti per un tempo considerevole ad un aerosol saturo di cariche virali.

La trasmissione di SARS-CoV-2 infatti può avvenire mediante aerosol contaminato. Le goccioline emesse durante l'espiazione di diametro superiore ai 5-10 micron cadranno vicino alla sorgente, mentre goccioline di diametro inferiore a 5 micron, possono formare aerosol con conseguente rischio di contagio. Queste goccioline

possono restare in sospensione per tempi considerevoli, inoltre eventuali flussi di aria possono veicolarle. [10]

Un secondo focolaio documentato per quanto riguarda la trasmissione aerea è avvenuto durante le prove del coro di Skagit Valley nel Mount Vernon. [11]

Prima delle prove corali non erano stati documentati casi di positività al SARS-CoV-2 all'interno della Contea di Skagit Valley. Si fa presente che durante le prove erano state altresì prese precauzioni, sia di distanziamento sociale e sia di disinfezione delle mani.

La sera delle prove corali, il 10 Marzo un soggetto aveva presentato sintomi simili ad un raffreddore. Il coro di Skagit Valley aveva 122 membri, 61 dei quali avevano partecipato alle prove; successivamente diversi membri del coro hanno accusato disturbi compatibili con la sintomatologia connessa a CoViD-19. Sono stati dunque identificati 53 casi di contagi e due di loro purtroppo sono morti per complicanze connesse a CoViD-19. [11], [12]

Nello studio di Miller et al. [11] infatti si dimostra che il rischio di infezione è strettamente correlato alla ventilazione all'interno di ambienti interni, dalla durata di permanenza dei soggetti e dalla loro distanza interpersonale; inoltre scenari, come quello descritto del focolaio di Skagit Valley sono definiti super diffusivi, in quanto il canto può generare importanti emissioni di quanti infettanti nell'aria.

Inoltre bisogna anche far presente che, oltre all'aumento delle concentrazioni di quanta che in uno scenario reale sono difficili da stimare, il canto produce anche un aumento delle concentrazioni di CO₂.

A tal proposito nell'analisi sperimentale di W. Schade et al. [13] sono state prese in considerazione le concentrazioni di CO₂ all'interno di un teatro. L'analisi sperimentale è stata condotta utilizzando un manichino, inserendo dei tubi in corrispondenza del naso e della bocca affinché si potesse simulare l'emissione mediante l'espiazione, di aerosol e anidride carbonica.

Il rischio derivante dal contagio infatti, in particolar modo per quanto riguarda il canto, può derivare dagli aerosols emessi durante l'espiazione, i quali possono essere veicolati dai flussi d'aria all'interno di un ambiente. [14], [15]

Le particelle contenute nel bioaerosol infatti, non risentono della forza di gravità e quindi possono essere veicolate da eventuali flussi d'aria all'interno di uno specifico ambiente. [10]

Il risultato dell'analisi sperimentale ci dimostra come la valutazione della CO₂ sia un metodo indiretto per stimare il possibile rischio di contagio da SARS-CoV-2.

Infatti concentrazioni nel range di 400 e 500 ppm indicano che vi è un livello buono di ventilazione all'interno dell'ambiente. [13], [16]

Non vi sono studi che riescono a stimare la soglia in cui si riescono ad evitare possibili contagi, comunque una concentrazione di 800 ppm sta a significare che l'1% del volume di aria che viene inspirata da un soggetto provenga dall'espiazione di un altro soggetto. [13]

L'analisi di Schade et al. [13] è stata effettuata all'interno di un teatro, dove la ventilazione è a flusso verticale, la mandata infatti si trova sotto le postazioni degli spettatori, ma è interessante far notare che la concentrazione dell'anidride carbonica può fornirci un feedback riguardo ad una probabilità di contagio.

Quindi, si rivela un marcatore indiretto per possibili rischi all'interno degli ambienti indoor. Negli ambienti chiusi vigendo l'obbligo di mascherina e distanziamento sociale, il rischio di trasmissione diretta (mediante tosse o starnuti) risulta contenuto; quello di cui ci dobbiamo preoccupare invece deriva come già descritto, dal "bioaerosol" di un soggetto infetto.

In tal modo una elevata presenza di anidride carbonica oltre a presentare discomfort per gli occupanti può essere un indicatore che non ci siano efficaci ricambi d'aria e quindi ci fornisce un "campanello di allarme" per il SARS-CoV-2.

2.2.1 VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI CONTAGIO

2.2.1.1 Valutazione del tasso di emissione ER_q

Lo studio di G. Buonanno et al. [8] riesce a fornire una valutazione del rischio di infezione identificando e discernendo il carico virale emesso in relazione alle attività eseguite all'interno di un determinato ambiente.

Un “quantum” viene definito come la dose infettante che è in grado di infettare il 63,2% di individui suscettibili. [5]

Il parametro ER_q [8] “Emission Rate of quanta” identifica l'emissione dei quanta che vengono emessi in un'ora [quanta/h] e viene definito mediante la seguente equazione:

$$ER_q = c_v \cdot c_i \cdot IR \cdot V_d = c_v \cdot \frac{1}{c_{RNA} \cdot c_{PFU}} \cdot IR \cdot V_d \quad [8]$$

L'equazione mette in correlazione la concentrazione della carica virale contenuta nei droplets in relazione al volume di aria espirata, che dipende dal grado di attività fisica.

Il tasso di emissione dei quanta infettanti dipende dal grado di attività di un soggetto, il valore che assume c_v identifica il carico virale nelle mucose orali di un soggetto e può variare in base alla sintomatologia dei soggetti che hanno contratto il virus.

Nello studio di G. Buonanno et al. [8] viene considerato un valore medio di c_v pari a 10^7 [RNA copies/ mL]; in realtà tale valore può assumere valori compresi in un range (10^3 - 10^{11} [RNA copies/ mL]. [8], [17]

Il secondo termine dell'equazione fa riferimento ad un fattore di conversione c_i il quale definisce il rapporto tra i quanta infettanti e la dose infettante espressa nelle copie di RNA.

Il tasso di inalazione IR “inhalation rate” identifica il flusso di inspirazione collegato al soggetto [m^3/h].

Il Volume di droplets V_d che viene espulso nell'ambiente come già scritto sopra, varia considerevolmente in base sia al grado di attività fisica del soggetto e in base al grado

di attività del soggetto (semplice respirazione, parlare con tono di voce leggero, parlare con tono di voce forte, canto etc.).

La concentrazione dei droplets definita come V_d può variare da un valore di 1×10^{-2} fino ad un valore di 5×10^{-2} [mL/m³].

Nello studio viene considerato un valore di 6×10^{-2} [mL/m³].

Per quanto riguarda il parametro c_{RNA} è stimato in $1,3 \times 10^2$ RNA copies PFU⁻¹ [3]

Il valore espresso nell'equazione come: c_{PFU} nello studio è stata considerato un valore di $2,1 \times 10^2$ PFU quanta⁻¹, data l'assenza di un valore relativo al SARS-CoV-2 quando è stato condotto lo studio. [8], [18]

Per quanto riguarda il parametro ER_q che valuta l'emissione dei quanta, è variabile da 3,7 [quanta/h] fino a circa 114 [quanta/h]; uno dei valori più ricorrenti è 67 [quanta/h]. La variabilità del parametro ER_q dipende da molteplici fattori, la carica virale del soggetto positivo al SARS-CoV-2 e anche all'attività respiratoria; inoltre il valore che assume il suddetto parametro dipende dal metodo utilizzato per il calcolo. [19]

2.2.1.2 Valutazione della concentrazione di quanta all'interno di un ambiente

Il secondo passo nello studio di G. Buonanno et al. [8] è quello collegato alla valutazione del rischio di infezione di soggetti esposti all'inalazione di quanta infetti.

Per determinare il rischio di contagio è necessario calcolare la concentrazione di cariche virali all'interno di un determinato ambiente e come ipotesi di fondo si considera che le cariche virali siano perfettamente miscelate. [5]

Il termine $n(t, ER_q)$ che è funzione del tempo e del carico virale ER_q , rappresenta la concentrazione dei quanta all'interno di uno specifico volume, esso viene espresso in quanta/m³:

$$n(t, ER_q) = n_0 \cdot e^{-IVRR \cdot t} + \frac{ER_q \cdot I}{IVRR \cdot V} \cdot (1 - e^{-IVRR \cdot t}) \quad [8]$$

Il termine n_0 definisce la concentrazione iniziale dei quanta, qualora fosse stato presente un soggetto infetto ad un tempo precedente.

Il parametro “ ER_q ” viene considerato pari a 67 [quanta/h].

Il termine “ I ” identifica il numero di soggetti infetti presenti all'interno di uno specifico ambiente.

V è il volume dell'ambiente preso in considerazione.

$IVRR$ [h^{-1}] fa riferimento al tasso di rimozione della carica virale nell'ambiente considerato ed è definito mediante la somma di tre coefficienti:

- Il parametro AER [h^{-1}] viene riferito alla ventilazione all'interno dell'ambiente, infatti se il tasso di ricambi orari tendesse ad infinito allora la concentrazione dei quanta presenti all'interno di un dato volume tenderebbe a zero.
- Il parametro k viene assunto pari a $0,24 h^{-1}$, questo parametro considera la deposizione dei quanta su superfici ed è stato stimato considerando un'altezza di emissione di 1,50 m. [20]
- λ è il tasso di inattivazione del virus, esso è stato stimato considerando un tempo di 1,1 h, pertanto il parametro λ è stato assunto pari a $0,63 h^{-1}$

2.2.1.3 Valutazione delle dosi infettanti inalate

Poi viene fatta la valutazione basata sulle dosi infettanti che un soggetto suscettibile all'infezione potrebbe inalare nel caso in cui si trovasse a contatto con un soggetto positivo al SARS-Cov-2. La dose infettante è pertanto calcolata integrando la concentrazione dei quanta all'interno dell'ambiente.

Al di fuori dall'integrale, abbiamo il coefficiente che fa riferimento alla portata di inalazione “Inhalation Rate, IR ”

$$D_q(ER_q) = IR \int_0^T n(t) dt \quad [quanta] \quad [8]$$

Il parametro IR è strettamente connesso all'attività svolta, infatti vi è una proporzionalità diretta tra la ventilazione polmonare e la dose infettante che verrà inalata. [8], [21]

Aumentando l'attività motoria infatti le dosi inalate saranno maggiori.

| Attività | IR [m ³ /h] |
|---------------------|--------------------------|
| Soggetto disteso | 0,49 |
| Attività sedentaria | 0,54 |
| Esercizio leggero | 1,38 |
| Esercizio pesante | 3,30 |

Tabella: 2.1 Valori di Inhalation Rate

2.2.1.4 Probabilità di contagio

La probabilità di contagio viene determinata con la seguente relazione sperimentale.

$$P_I = 1 - e^{-Dq} \quad [\%] \quad [8]$$

2.3 VENTILAZIONE: COMFORT, IAQ E RISCHIO DI CONTAGIO

La ventilazione gioca un ruolo chiave non solo per quanto riguarda la riduzione del rischio di contagio da SARS-CoV-2; ma anche per quanto riguarda il Comfort Indoor degli occupanti e l'Indoor Air Quality.

Definizione di Comfort Indoor, in accordo con la UNI EN ISO 7730:

Condizione che esprime la soddisfazione con l'ambiente termico circostante [22]

La condizione di Comfort Indoor non è strettamente legata ad evidenze quanto a preferenze che variano da persona a persona, che variano nelle circostanze e derivano anche da fattori psicologici.

Il comfort degli occupanti all'interno di ambienti ventilati meccanicamente va garantito, non solo considerando ricambi d'aria adeguati in base all'affollamento ed alla destinazione d'uso. Bisogna considerare che ogni caso di progettazione è a sé stante, il comfort Indoor infatti varia in accordo con l'ambiente, in quanto casistiche di discomfort, derivano da asimmetrie radianti ed eventuali turbolenze d'aria all'interno dell'ambiente indoor.

L'asimmetria della temperatura radiante avviene quando in uno spazio chiuso le superfici circostanti si trovano tipicamente a differenti temperature.

Anche se le condizioni di comfort globale sono raggiunte, non è detto che per tutti gli occupanti vi sia comfort; in quanto le condizioni di comfort locale potrebbero anche non essere raggiunte. Condizioni termiche disuniformi possono creare disagio negli occupanti.

Il discomfort all'interno di un ambiente può essere dovuto ad eventuali correnti d'aria che si creano nell'ambiente indoor; certi livelli di temperatura interna, unitamente a velocità dell'aria impropria possono infatti causare discomfort degli occupanti.

Le eventuali correnti d'aria vengono stimate con l'indice noto come "Draught Rate", il quale è dovuto alla turbolenza locale, velocità dell'aria e temperatura.

Successivamente al Draught Rate verrà correlato il “Draught risk” ossia la percentuale di persone che non saranno soddisfatte dal valore locale di turbolenza all'interno dell'ambiente interno.

Per quanto riguarda i periodi dell'anno è necessario pertanto definire le condizioni di comfort:

- Condizioni di comfort invernale:
 - Temperatura operativa: è la temperatura che si ottiene da una media pesata partendo dalla temperatura dell'aria dell'ambiente t_A , dalla temperatura media radiante t_{mr} e dai coefficienti di scambio termico convettivo e per irraggiamento:

$$t_{op} = \frac{h_c t_A + h_r t_{mr}}{h_c + h_r} = 20 \div 23^\circ C$$

- Velocità media dell'aria: $v < 0,15$ m/s
 - Umidità relativa: $50\% \pm 10$
- Condizioni di comfort estivo:

- Temperatura operativa:

$$t_{op} = \frac{h_c t_A + h_r t_{mr}}{h_c + h_r} = 24 \div 26^\circ C$$

- Velocità media dell'aria: $v < 0,25$ m/s
- Umidità relativa: $50\% \pm 10$

Un altro tipo di discomfort può essere invece correlato a contaminanti presenti all'interno dell'edificio ed è denominato “Sick Building Syndrome”, ossia “sindrome da edificio malato” e riguarda una situazione di discomfort degli occupanti che ha ripercussioni anche sulla salute delle persone. [23]

I fattori di rischio per quanto riguarda l'edificio malato sono valori di umidità relativa bassa ed insufficiente ventilazione e la sindrome "SBS" è causata da polveri, pollini, funghi, muffe e virus e anche alla presenza di Composti Organici Volatili (VOC).

Un altro aspetto da tenere in considerazione riguarda il comfort termico degli occupanti e l'IAQ, la quale, nel caso relativo al virus SARS-COV-2 è resa correlata dalla concentrazione di anidride carbonica.

Lo studio di Shendell et al. [24] ha dimostrato come la presenza di CO₂ può influire sia sulle prestazioni scolastiche degli studenti. Con una concentrazione superiore a 1000 ppm era associato un aumento del 10-20% delle assenze degli studenti.

Pertanto la ventilazione come livello di partenza deve soddisfare le condizioni di comfort all'interno degli ambienti indoor, inoltre deve essere garantito un rinnovo d'aria, sia per l'Indoor Air Quality e soprattutto per mitigare il rischio Covid.

Per quanto riguarda la diminuzione del rischio di contagio da virus SARS-CoV-2, la finalità è quella che di cercare di garantire in primis l'espulsione dell'aria interna contaminata e la sua diluizione per ridurre il rischio di infezione da aerosol infetto.

Il tasso di ventilazione, espresso con il tasso di ricambio orario viene definito con la seguente formula:

$$n = \frac{q_v}{V}$$

Dove:

- n è il tasso di ricambio orario (h^{-1})
- q_v è la portata d'aria di rinnovo immessa nell'ambiente (m^3/h)
- V è il volume dell'ambiente (m^3)

Il volume dell'aula S3 di Scienze è di 476,50 m³, pertanto il tasso di ricambio orario massimo sarà di circa 5,0 h⁻¹ considerando la massima portata che possono fornire i due recuperatori termodinamici (2400 m³/h).

Per quanto riguarda gli impianti aeraulici occorre tener presente che occorre garantire una buona progettazione di partenza, relativa alla disposizione delle griglie di espulsione e delle prese di aria esterna. La disposizione ha l'obiettivo di evitare dei cortocircuiti d'aria dovuti a possibili interferenze tra i flussi, esse non devono essere né contrapposte e né ravvicinate; come anche descritto nel Rapporto n.33 dell'Istituto Superiore di Sanità. [25]

Inoltre va tassativamente evitato il ricircolo dell'aria interna, in quanto l'aria interna prelevata va assolutamente asportata in quanto è da considerarsi sempre contaminata.

Per quanto riguarda invece i servizi igienici bisogna tener presente che una possibile via di trasmissione può derivare da aerosol di origine oro-fecale.[25], [26]

Nello studio di Chen et al. [26] viene evidenziato come le feci di circa i due terzi di soggetti positivi al SARS-CoV-2 presentassero tracce di RNA del virus. Inoltre le tracce di RNA possono permanere anche da sei a dieci giorni dopo la negatività di un tampone faringeo. Quindi bisogna evitare che le prese d'aria all'interno dei servizi igienici siano disposte in serie. [25]

Un altro aspetto da tener in considerazione è legato alla movimentazione d'aria all'interno di un ambiente, le velocità infatti, come anche riportato nel Rapporto n.33 dell'Istituto Superiore di Sanità devono essere contenute.

Infatti per velocità dell'aria superiori a 2 m/s si hanno fenomeni di trascinamento [25], mentre già a velocità superiori a 0,25 m/s la gittata delle gocce emesse può aumentare; pertanto il rischio è quello di vanificare le politiche di riduzione del rischio di contagio.

Inoltre l'umidità relativa, insieme alla temperatura di uno specifico ambiente, giocano un ruolo anche nella potenziale trasmissione di un virus.

Lo studio di Lowen et al. [27] ha preso in esame la potenziale trasmissibilità dell'influenza stagionale utilizzando otto cavie di porcellini d'india. Il flusso d'aria (con le dovute condizioni di temperatura e umidità relativa) è stato fatto passare attraverso delle camere ambientali.

Le camere erano disposte su due colonne, la prima formata da quattro camere ambientali contenenti ciascuna le quattro cavie suscettibili al contagio, mentre nella seconda vi erano le cavie positive al virus dell'influenza stagionale.

Il flusso d'aria pertanto prima attraversava la colonna, dove si trovavano le quattro cavie infette e successivamente avrebbe attraversato l'altra colonna con le camere dei porcellini d'india sani.

Dallo studio è emerso che la trasmissione avveniva con maggiore frequenza a basse temperature (5°C) e ad umidità relativa bassa (20-30%). Invece con alte temperature (30°C) e ad umidità relative rispettivamente del 20-30% e dell'80% la trasmissione diviene più difficoltosa.

A 20°C e 50% di umidità solo una delle quattro cavie è stata contagiata, mentre a 20°C e con una umidità relativa del 65% tre dei quattro porcellini d'india esposti sono stati infettati. Con un tasso di umidità dell'80% invece non è stato rilevato alcun contagio tra i porcellini d'india.

Sebbene lo studio sia stato condotto con il virus dell'influenza stagionale, questo ci può far presupporre che anche la trasmissibilità del SARS-CoV-2 sia correlata ai tassi di umidità relativa ed alla temperatura di un ambiente.

Dato che lo studio è stato condotto con il virus dell'influenza stagionale, è necessario capire se le considerazioni valgono anche per il virus SARS-CoV-2.

Per confutare queste supposizioni dunque è necessario far riferimento allo studio di Yuan et al. [4] dal quale si nota che ad umidità relative basse inferiori al 30% il virus si può mantenere attivo. Il volume d'aria che lambisce i polmoni e viene espirato presenta un'umidità relativa del 100%, quando i droplets fuoriescono dalle vie respiratorie variano le proprie dimensioni in quanto si trovano a contatto in un'ambiente ad umidità relativa minore. [2]

Questa variazione di condizioni di umidità relativa fa evaporare le goccioline [4], pertanto il rischio di trasmissione aumenta in quanto le particelle diminuiscono il loro volume e quindi aumenta la probabilità che esse possano restare in sospensione nell'aria.

Inoltre la sopravvivenza sulle superfici aumenta di molto in condizioni di umidità relativa bassa, mentre la vita delle cariche virali sulle superfici diminuisce ad alte temperature (30°C) e ad alti tassi di umidità relativa [28], [29]

Infatti bisogna porre l'attenzione non solo alla trasmissione diretta, ma anche a quella derivante dalle superfici contaminate, considerando un'aula universitaria la sanificazione degli ambienti e l'utilizzo di gel disinfettante è di fondamentale importanza.

All'interno di un edificio i tassi di umidità non possono essere elevati ma devono essere mantenuti costanti di circa $50\% \pm 10$ per poter avere il comfort, ma allo stesso tempo valori bassi di umidità relativa uniti a temperature basse e concentrazioni superiori ad 800 ppm devono suonare come un campanello di allarme.

CAPITOLO 3:

3 CASO DI STUDIO

3.1 RILIEVO DELL'AULA

L'aula S3 di Scienze ha una larghezza di 10,19 m e una lunghezza di 14,32 m, con le postazioni per gli studenti distribuite in due zone dell'aula.

L'aula ha una capienza di 136 persone, con le disposizioni per limitare il contagio da SARS-CoV-2 è consentito un ingresso massimo di 47 persone.

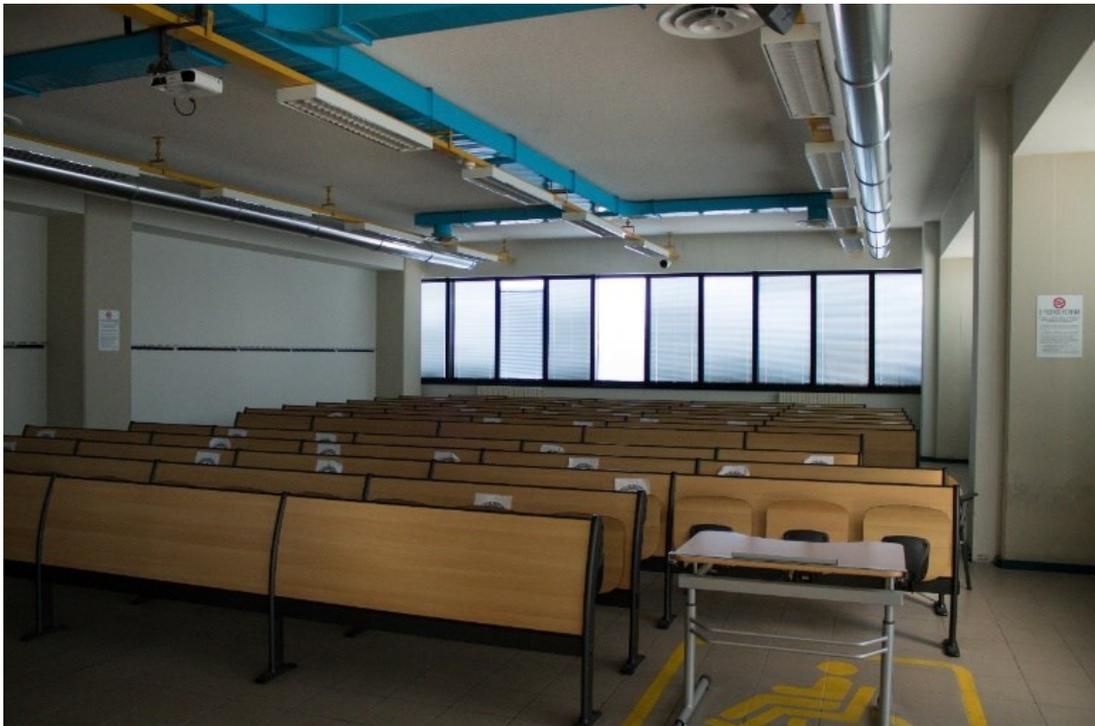


Figura 3.1: Foto aula S3

Il rilievo è stato effettuato mediante rotella metrica e grazie all'ausilio di metro laser.

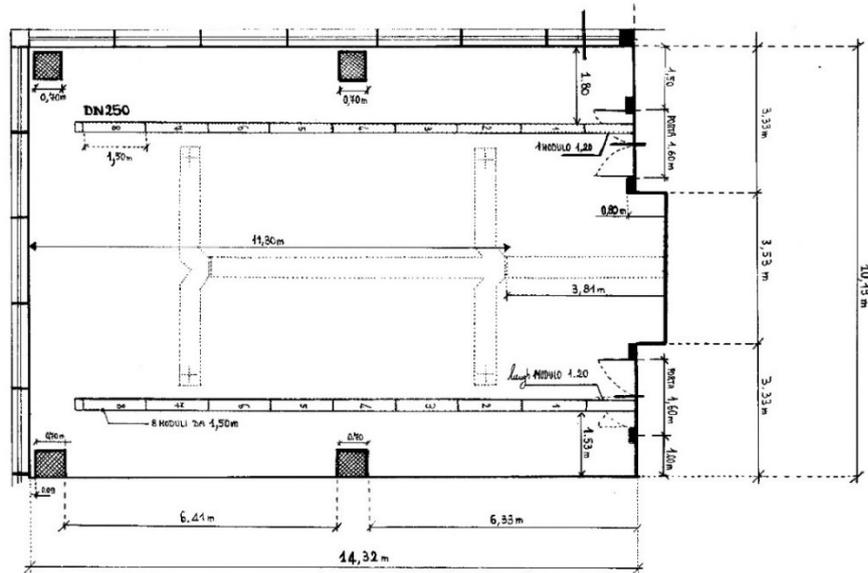


Figura 3.2: Rilievo dell'aula

È stato effettuato il rilievo dell'aula e dell'impianto al fine di creare un modello tridimensionale qualitativo dell'aula mediante il software Revit.

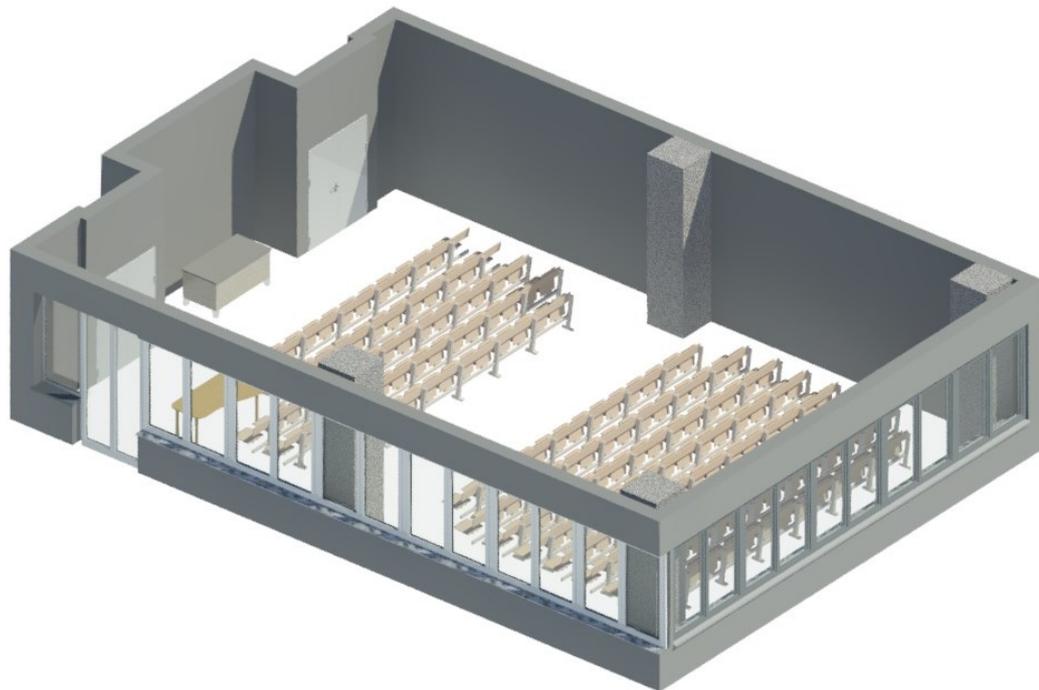


Figura 3.3: Visualizzazione 3D dell'aula S3 (visualizzazione Raytrace)



Figura 3.4: Modello 3d dell'aula S3 di Scienze

Il modello è stato necessario in quanto occorre la disposizione delle postazioni degli studenti per poi procedere con il monitoraggio dell'ambiente.

Il monitoraggio verrà effettuato in 9 stazioni, disposte a griglia all'interno dell'aula; considerando le principali zone dell'aula.

3.2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO



Figura 3.4: Foto aula S3

Dalla foto sopra si possono notare i due distinti impianti presenti:

- L'impianto preesistente
- L'impianto composto da due recuperatori termodinamici Aermec RTD11 e da due canali microforati (mandata).

3.2.1.1 Impianto preesistente

L'impianto preesistente presenta canali rettangolari di sezione 50x20 cm con connessioni flangiate (in color ciano) e con quattro anemostati come unità terminali.

Il canale inizia al centro del lato minore dell'aula e a 3,80 m di canale è presente una connessione a T dove ci sono i primi due anemostati; successivamente si estende per 7 m e termina con una connessione a coda di rondine dove sono presenti i restanti due anemostati.



Figura 3.2: Foto dei terminali dell'impianto preesistente (anemostati)

Da precedenti misurazioni risulta che le portate fornite da ciascun anemostato sono:

255 m³/h, 262 m³/h, 255 m³/h e 216 m³/h; per un totale di 988 m³/h.

3.2.1.2 Impianto di nuova costruzione

L'impianto di nuova costruzione è stato installato a seguito dell'emergenza CoViD, durante il periodo estivo, pertanto aggiungendosi in una situazione in cui era già presente un impianto la posa in opera è stata difficoltosa.

L'impianto è composto da due recuperatori termodinamici Aermec RTD11 che servono (per quanto riguarda la mandata) un canale microforato ciascuno.

La portata d'aria che può essere gestita da ciascun recuperatore termodinamico varia da 950 m³/h fino a 1200 m³/h.



Figura 3.3: dettaglio del recuperatore termodinamico Aermec RTD11 dal controsoffitto



Figura 3.4: dettaglio del recuperatore dal modello di Revit (raytrace)

L'impianto di mandata, realizzato con canali microforati è composto da nove moduli da 1,50 m connessi mediante fascette ad omega ed ancorati a soffitto.

La circonferenza del canale, misurata mediante rotella metrica è risultata di circa 90 cm, dunque il diametro esterno misurato risulta essere di circa 28,32 cm; pertanto il canale risulta essere un DN250.

I primi due moduli hanno una lunghezza di 1,50 m, i fori hanno un diametro di 2 mm, disposti secondo una maglia rettangolare di 10 cm.

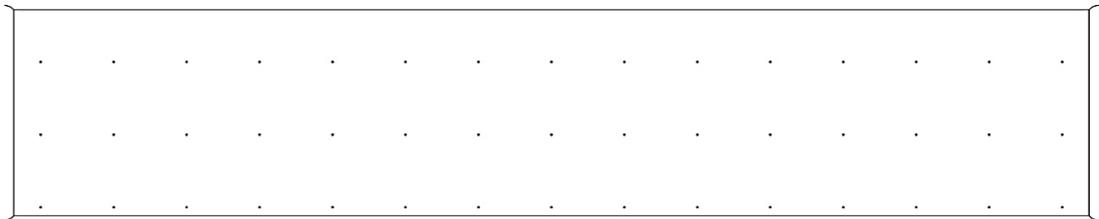


Figura 3.5: prospetto modulo maglia 10 cm x 10 cm



Figura 3.6: foto modulo maglia 10 cm x 10 cm

Il primo modulo in realtà risulta essere di 1,20 m, in quanto è incassato per 30 cm all'interno della parete per la connessione al recuperatore termodinamico.

Dopo i primi due moduli vi è una variazione della foratura del canale, da una maglia regolare a 10 cm si passa ad una maglia principale da 10 cm; con la parte inferiore del canale caratterizzata da una maglia da 2 cm.

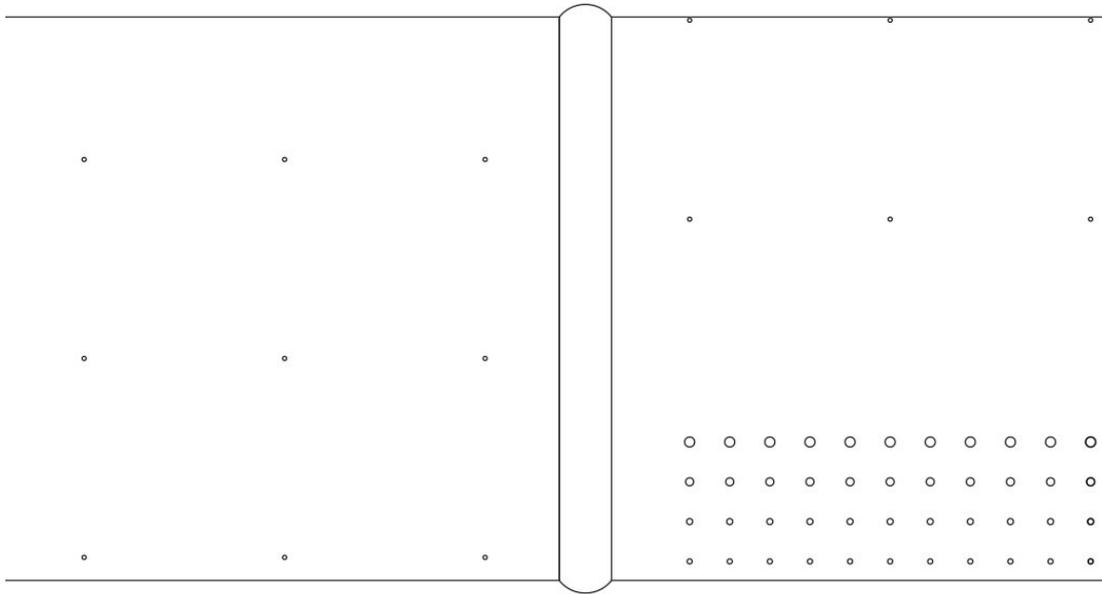


Figura 3.7: prospetto canale con variazione della foratura

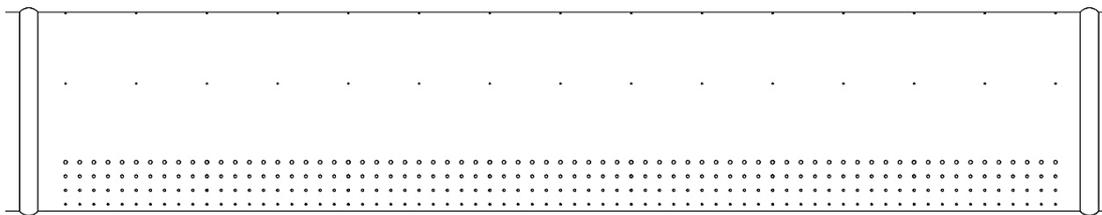


Figura 3.8: prospetto della seconda tipologia di modulo



Figura 3.9: foto della seconda tipologia di modulo

La maglia da 2 cm è composta da tredici file di fori, nello specifico:

| Fila di fori | Diametro fori [mm] |
|---------------------|---------------------------|
| 1 ^a | 5 |
| 2 ^a | 4 |
| 3 ^a | 3 |
| 4 ^a | 2,5 |
| 5 ^a | 2 |
| 6 ^a | 2 |
| 7 ^a | 2 |
| 8 ^a | 2 |
| 9 ^a | 2 |
| 10 ^a | 2 |
| 11 ^a | 2 |
| 12 ^a | 2 |
| 13 ^a | 2 |

Tabella 3.10: diametro dei fori nel secondo tratto del canale microforato

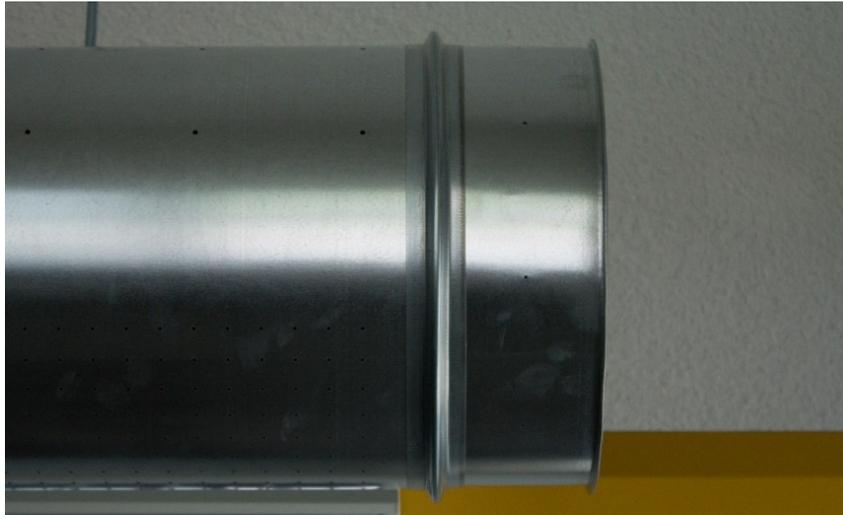


Figura 3.11: foto del tappo del canale microforato

La peculiarità dei canali microforati è di fornire una destratificazione verticale dell'aria all'interno di uno specifico ambiente. L'aria pertanto non viene immessa in modo puntuale ma bensì in maniera distribuita, così da permettere quantomeno una diluizione di eventuali aerosols infetti; porgendo una soluzione al problema del contagio per via aerea.

Si ricorda infatti, che l'aerosol di per sé rappresenta un rischio per gli ambienti interni e gli impianti che immettono l'aria in maniera puntuale e/o con elevate velocità, rappresentano un problema in quanto possono in concreto veicolare particelle virali e quindi vanificare tutti gli sforzi per arginare il rischio di contagio.

La velocità di immissione all'interno dell'ambiente è affidata ai microfori, con diametri e fasce dimensionate in modo tale da avere dei lanci adeguati alla zona servita. La velocità dell'aria in uscita da ciascuno foro sul canale, è la medesima in tutti i tratti, mentre la velocità media diminuisce fino a zero in corrispondenza del tappo del canale. La pressione statica è costante lungo tutto il canale e in corrispondenza del foro la pressione statica si trasformerà in pressione dinamica. La portata in corrispondenza dell'imbocco del canale sarà pari a quella di immissione, fino ad assumere un valore nullo in corrispondenza del tappo del canale.

La pressione totale invece varia lungo lo sviluppo del canale, avrà un valore maggiore all'imbocco del canale e un valore minore in corrispondenza del tappo, in quanto; la velocità media e quindi la pressione dinamica sarà nulla in corrispondenza del tappo.

3.2.1.3 Misurazione delle pressioni statiche dei canali microforati

I valori di pressione statica, per quanto riguarda i fori presenti nei canali microforati, sono stati determinati con un manometro differenziale "Testo 510". Il tubo in silicone è stato collegato allo strumento e l'altra estremità è stata applicata al foro, dove si è voluta misurare la pressione statica, ponendo attenzione a sigillare lo spazio attorno al foro per acquisire misure valide.



Figura 3.12: manometro differenziale Testo 510

Pertanto, facendo riferimento ai nove tratti dei canali microforati sono state misurate le pressioni per ciascun tratto. I valori misurati dal manometro differenziale in hPa, sono stati quindi convertiti in Pa e vengono riportati nella tabella sottostante.

| Moduli canale | Canale sx | Canale dx |
|----------------------|------------------|------------------|
| modulo 1 | 79 Pa | 79 Pa |
| modulo 2 | 79 Pa | 79 Pa |
| modulo 3 | 82 Pa | 82 Pa |
| modulo 4 | 82 Pa | 82 Pa |
| modulo 5 | 84 Pa | 84Pa |
| modulo 6 | 85 Pa | 85 Pa |
| modulo 7 | 87 Pa | 87,5 Pa |
| modulo 8 | 88,5 Pa | 88 Pa |
| modulo 9 | 90 Pa | 90 Pa |

Figura 3.13: modello 3d dell'aula S3 di Scienze

Sotto si fornisce il render al fine di individuare i canali oggetto delle misurazioni.



Figura 3.14: modello 3d dell'aula S3 di Scienze

3.2.1.4 Differenze tra recuperatore statico e recuperatore termodinamico

La tipologia del recuperatore può giocare un ruolo per quanto riguarda la riduzione di un eventuale rischio correlato al Covid.

Il recuperatore statico è caratterizzato al suo interno da uno scambiatore di calore (heat exchanger, *Figura 3.20*) formato da piastre generalmente in acciaio inox.

Il recupero di una quota parte di energia termica, avviene mediante lo scambiatore di calore, considerando il periodo invernale infatti l'aria prelevata dall'ambiente interno avrà un contenuto entalpico maggiore rispetto all'aria esterna. L'aria prelevata dall'ambiente interno (EXHAUST AIR) dunque cederà una quota parte di calore alle piastre, le quali a loro volta cederanno calore all'aria proveniente dall'ambiente esterno (OUTSIDE AIR).

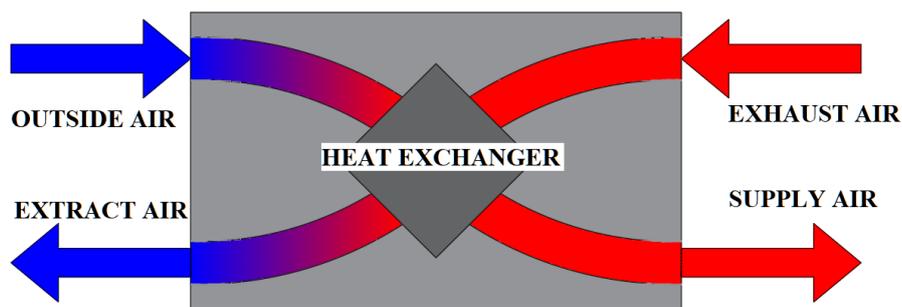


Figura 3.20: schema di un recuperatore statico

I flussi d'aria all'interno dello scambiatore di calore si incrociano ma in realtà sono separati dalle lamelle dello scambiatore (destinate ad aumentare l'efficienza di scambio termico). Il funzionamento del recuperatore statico potrebbe presentare un problema qualora, in seguito all'usura, si dovessero formare fori nelle piastre dello scambiatore.

In tal caso l'aria esausta (contaminata) potrebbe miscelarsi con l'aria di immissione e quindi aumentare il rischio Covid.

La miglior soluzione di recuperatore può essere rappresentata dall'utilizzarne uno con i flussi separati. All'interno di un recuperatore termodinamico i flussi sono fisicamente separati, questo impedisce il miscelamento dell'aria nei due flussi, andando a favore della prevenzione del rischio di contagio.

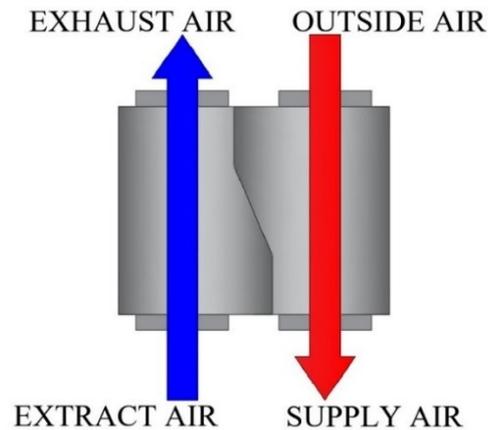


Figura 3.21: schema del recuperatore termodinamico

Il recuperatore termodinamico permette di recuperare dal flusso dell'aria di ripresa una quota parte di calore. Il recuperatore è ad espansione diretta, il ciclo frigorifero con refrigerante R410a effettua lo scambio di energia dal flusso di aria a temperatura più elevata a quello a temperatura più bassa.

Nel caso di riscaldamento l'effetto utile è situato nel condensatore e pertanto il recuperatore funzionerà come pompa di calore nel caso invernale.

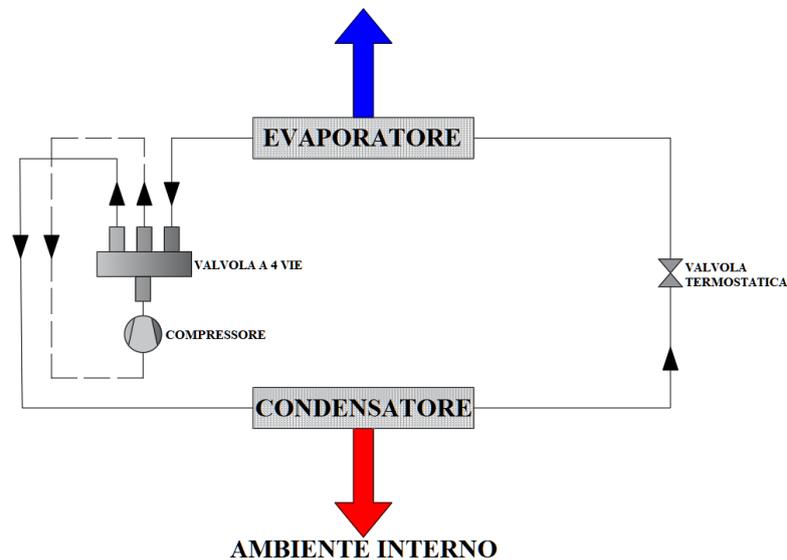


Figura 3.22: circuito della pompa di calore, funzionamento in riscaldamento

Mediante una valvola a 4 vie il ciclo può diventare reversibile così da permettere che l'effetto utile necessario in termini di raffreddamento avvenga all'evaporatore. Pertanto durante il funzionamento nel periodo invernale, il circuito funzionerà come macchina frigorifera.

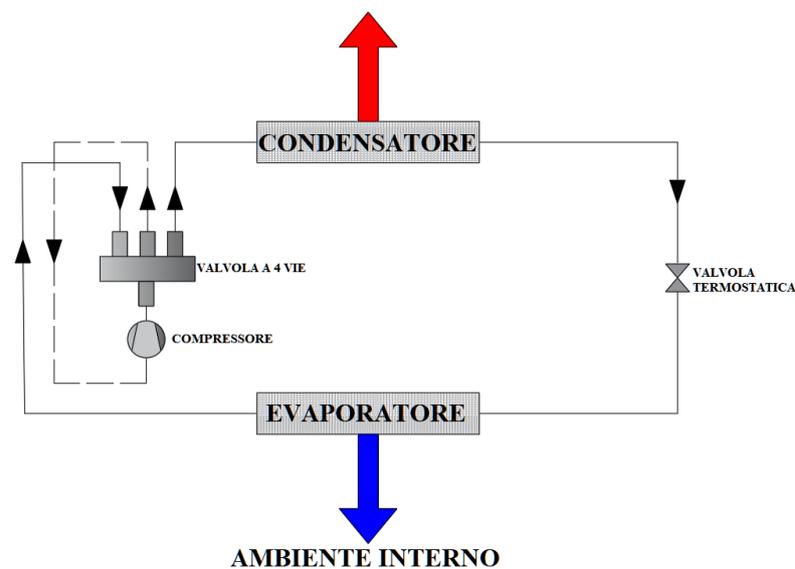


Figura 3.23: circuito della pompa di calore, funzionamento in raffreddamento

3.2.1.5 Funzionamento dell'impianto in fase di raffrescamento

Le misurazioni sono state effettuate il 30 Giugno, settando la temperatura di mandata a 25°C e la portata (complessiva) a 2400 m³/h, mediante il pannello a bordo macchina.

I valori di temperatura dell'aria dell'ambiente sono stati misurati mediante una termocoppia.



Figura 3.24: termocoppia Delta Ohm 9016

Per rappresentare graficamente la distribuzione della temperatura dell'aria all'interno dell'aula S3 è stato utilizzato il software "Tecplot 360 EX". È stata realizzata una tabella Excel, i valori presenti nella prima riga e nella prima colonna fanno riferimento alle quote dove sono state effettuate le stazioni.

| | | | |
|---------|---------|---------|----------|
| | 3 [m] | 7,1 [m] | 10,9 [m] |
| 1,5 [m] | 30,4 °C | 30,5 °C | 30,3 °C |
| 5,2 [m] | 30,5 °C | 30,4 °C | 30,6 °C |
| 8,4 [m] | 30,4 °C | 30,6 °C | 30,5 °C |

Tabella 3.25: tabella "carpet" per l'importazione dei dati su Tecplot 360 EX

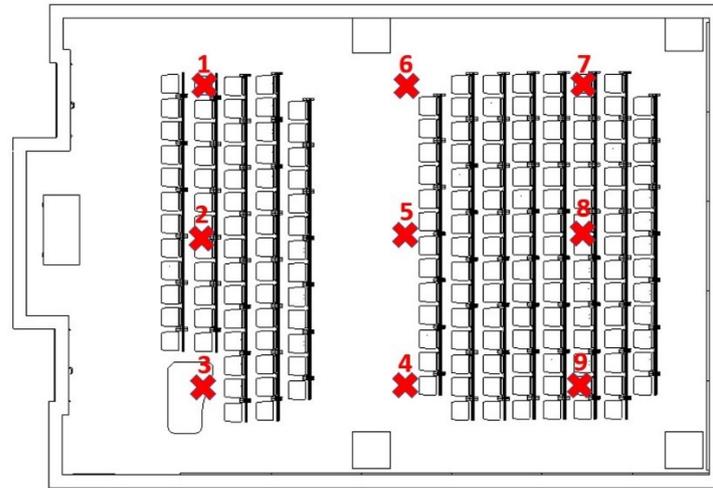


Figura 3.26: planimetria dell'aula S3 con la disposizione delle stazioni (dal modello Revit)

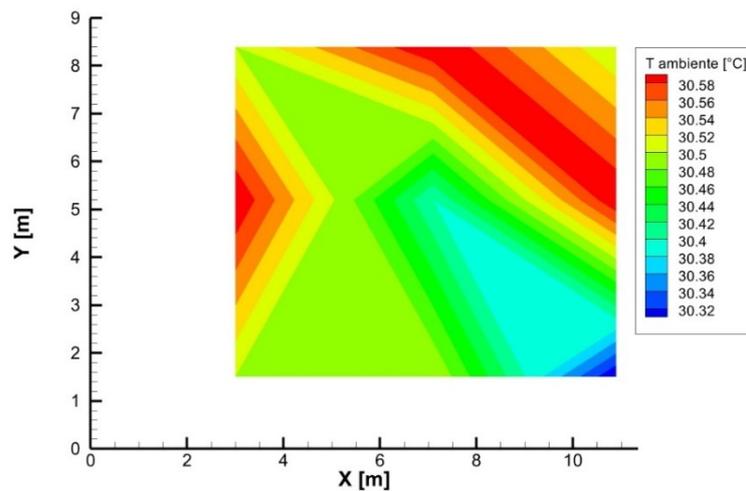


Grafico 3.27: distribuzione della temperatura dell'aria dell'ambiente (Tecplot 360 EX)

Le variazioni di temperatura misurate dalla termocoppia sono risultate comprese tra 30,3 °C e 30,6 °C. Come si può notare dal *Grafico 3.25* la zona in cui si hanno temperature maggiori è quella antecedente alla cattedra e nella zona del canale microforato adiacente alla parete. La temperatura dell'aria esterna verso mezzogiorno il 30 Giugno era di circa 34°C, con una temperatura di mandata di 25°C si riescono ad ottenere circa 4°C di differenza con la temperatura esterna.

3.2.1.6 Acustica dell'impianto

I valori sono stati misurati mediante un fonometro l'11 Marzo 2021, durante le prime prove di monitoraggio. I valori fanno riferimento all'impianto con portata minima pari a 950 m³/h.

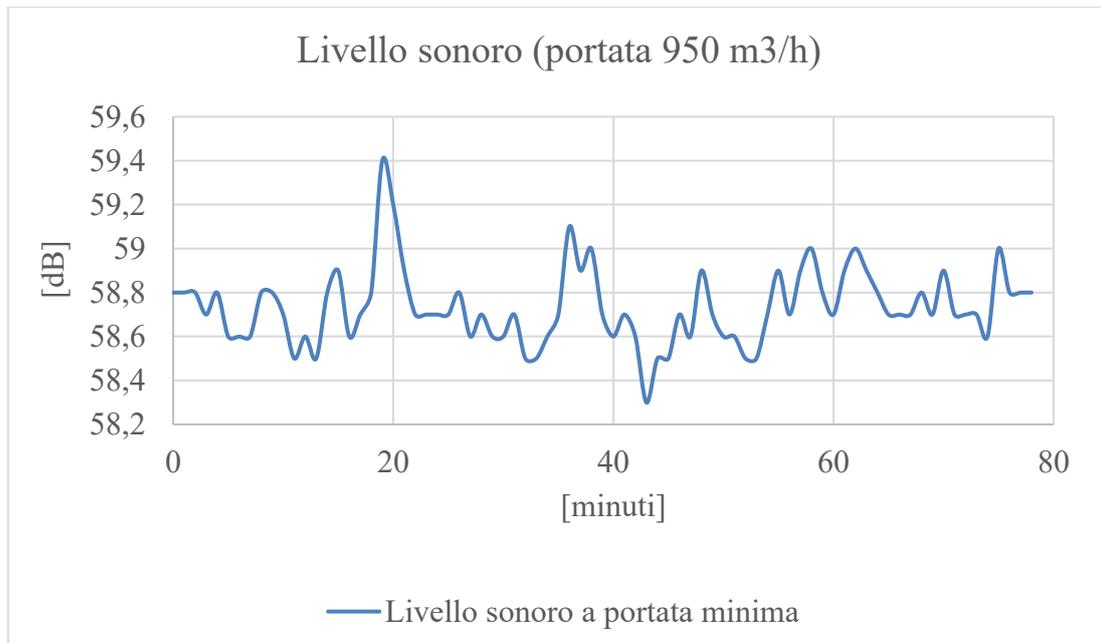


Grafico 3.28: livello sonoro dell'impianto con la portata minima

Dal grafico si nota che i valori in dB misurati con il fonometro, restano compresi (effettuando una media) a circa 58,00 dB, ma bisogna considerare eventuali rumori di fondo.

Nello studio sperimentale di Serpilli et al. [30] sono stati determinati i livelli di pressione sonora dell'impianto:

| Portata [m ³ /h] | $L_{ic,int}$ dB (A) |
|-----------------------------|---------------------|
| 950 | 57,6 |
| 1200 | 58,5 |

Tabella 3.29: tabella dei livelli sonori dell'impianto

Bisogna considerare che, secondo il D.P.C.M. 5 Dicembre 1997 [31] il valore massimo per quanto riguarda i requisiti acustici passivi è di 35 dB. Quindi non si rientra nel limite.

Il rumore di fondo deve essere preso in considerazione durante lo svolgimento delle lezioni per il comfort acustico degli occupanti.

Date le lunghe permanenze all'interno dell'aula, sarebbe auspicabile introdurre dei silenziatori e quindi attuare un controllo passivo, quanto meno per ridurre rumori dovuti a vibrazioni all'interno dell'impianto. Oppure si potrebbe implementare un controllo attivo (ma complesso da realizzare).

Partendo da un profilo occupazionale si potrebbe pensare di installare un microfono (sensore) che capti il rumore, dalla successiva profilazione del rumore, tramite uno speaker (attuatore) si emetterà il medesimo rumore ma in controfase rispetto al rumore originario. Quindi il rumore con la fase invertita si andrebbe a sommare con il rumore a fase "originale" andando così a determinare un'interferenza distruttiva sull'onda sonora, con la conseguente riduzione del rumore dell'impianto.

CAPITOLO 4:

4 CASO DI STUDIO

4.1 MONITORAGGIO DELL'AULA S3

Dopo aver effettuato il rilievo dell'aula S3 di Scienze e aver realizzato il modello tridimensionale dell'aula nel software Revit, si è proceduto ad effettuare una valutazione del comfort indoor mediante centralina microclimatica.

L'analisi è stata effettuata suddividendo l'ambiente in nove stazioni. Ciascuna di queste stazioni è stata monitorata per un tempo pari a dieci minuti, considerando che non sia presente una eccessiva movimentazione d'aria all'interno dell'ambiente.

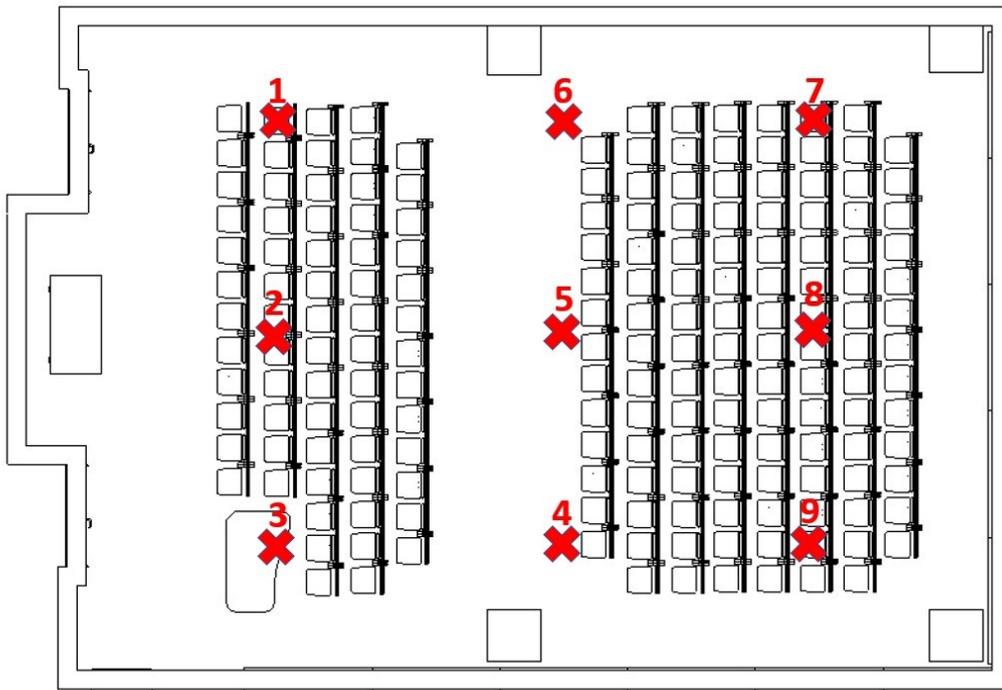


Figura 4.1: planimetria dell'aula S3 con la disposizione delle stazioni (dal modello Revit)

4.1.1 TEMPERATURA DI SET-POINT E PORTATA

Il controllo del recuperatore può avvenire mediante due modalità: tramite il pannello a bordo macchina o tramite lo schermo virtuale (mediante il Modbus).



Figura 4.2: display con la temperatura di Set-Point

La temperatura di mandata è stata settata mediante il pannello a bordo macchina a 20°C, per quanto riguarda la portata è stata settata a 1200 m³/h. La portata d'aria che può essere gestita da ciascun recuperatore termodinamico varia da un minimo di 950 m³/h fino ad un massimo 1200 m³/h.

L'impianto di mandata composto da due canali microforati, pertanto, essendo gestito da due recuperatori termodinamici ha una portata massima complessiva di 2400 m³/h.

4.1.2 SENSORI PER IL MONITORAGGIO

Per la valutazione del comfort indoor è stata utilizzata la centralina microclimatica Comfort Sense di Dantec Dynamics.

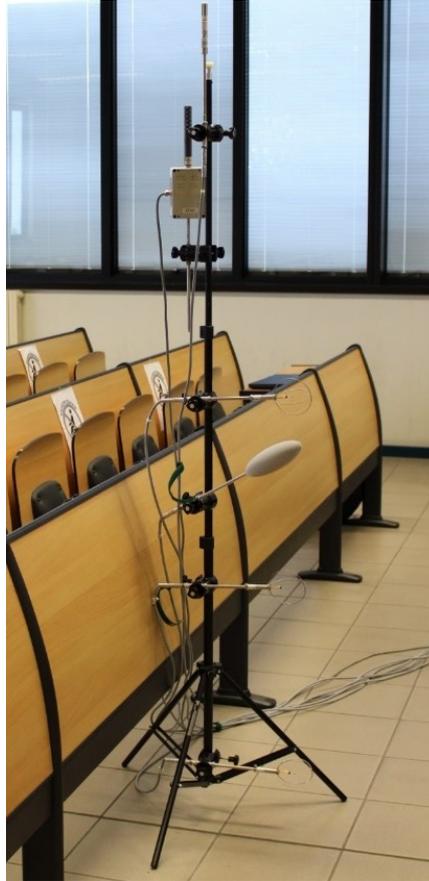


Figura 4.3: foto della stazione Comfort Sense di Dantec Dynamics

La stazione Comfort Sense di Dantec Dynamics presenta i seguenti sensori:

- Sensori di temperatura e velocità dell'aria
- Sensore di umidità relativa
- Globotermometro per misurare la temperatura operativa.

Inoltre è stato aggiunto un sensore di CO₂ per misurare la concentrazione dell'anidride carbonica all'interno dell'ambiente.

I valori di temperatura e di velocità dell'aria sono stati determinati ponendo i sensori secondo determinate altezze facendo riferimento alle parti del corpo umano riferite ad una persona seduta.

I sensori sono stati fissati sull'asta alle altezze di 10 cm (caviglie), 60 cm (busto) e 110 cm (testa) e il globotermometro è stato posizionato ad un angolo di 45° per tenere conto della posizione seduta della persona.

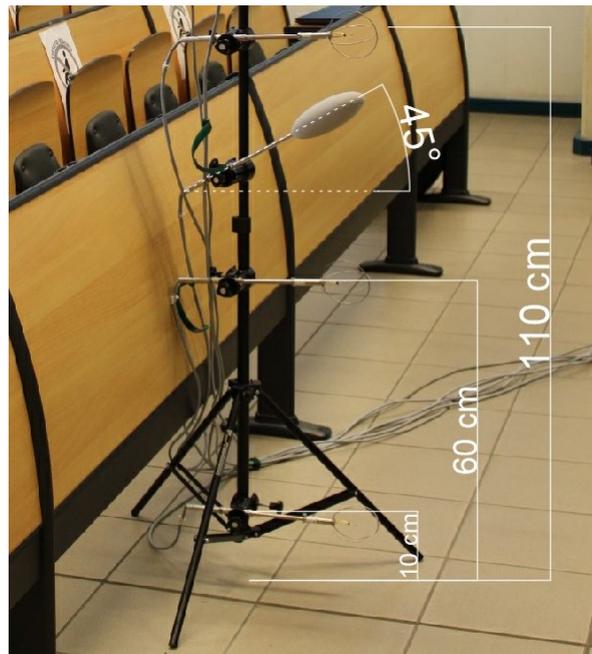


Figura 4.4: foto della posizione dei sensori di temperatura e angolazione del globotermometro

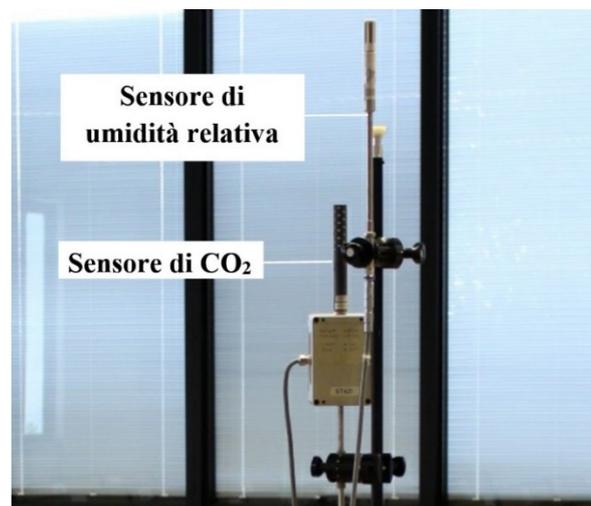


Figura 4.5: foto dei sensori di umidità relativa e CO_2

Il parametro relativo all'abbigliamento, considerando un vestiario primaverile è stato assunto pari 0,85 clo.

I parametri ottenuti da Labview tramite spreadsheet sono stati dunque riportati su Excel e suddivisi in fogli, dove ciascuno di essi fa riferimento alle misure che sono state effettuate nella medesima stazione. I dati sono poi stati filtrati, andando ad eliminare i valori di velocità dell'aria che corrispondevano all'istante in cui il treppiede della stazione microclimatica Dantec veniva spostato di stazione in stazione.

CAPITOLO 5

5 RISULTATI SPERIMENTALI

In questo Capitolo si mostrano i risultati dell'analisi sperimentale effettuata all'interno dell'aula S3 con la centralina microclimatica di Dantec Dynamics.

5.1.1 MONITORAGGIO CON I RECUPERATORI TERMODINAMICI ACCESI

Nella tabella sottostante sono presentati i valori di temperatura, temperatura operativa e velocità, riferiti rispettivamente alle caviglie, busto e testa.

Le temperature e le velocità vengono pertanto contrassegnate con il valore relativo all'altezza a cui sono state misurate:

T, v "10" (caviglie); T, v "60" (busto); T, v "110" (testa).

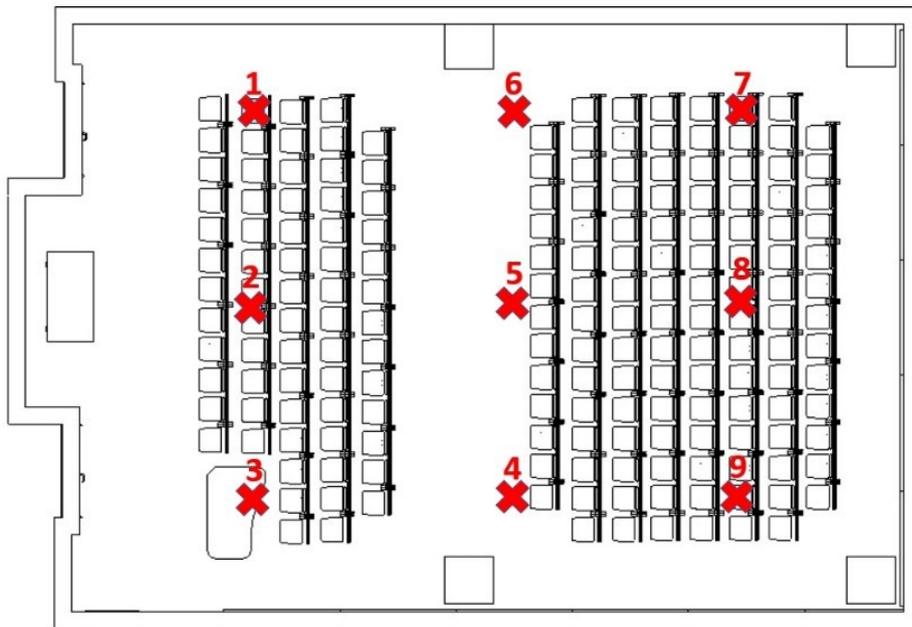


Figura 5.1: planimetria dell'aula S3 con la disposizione delle stazioni

TABELLA impianto acceso con portata massima (complessiva) pari a 2400 m³/h.

(Valori medi per 10 minuti di monitoraggio).

| STAZIONI | T10 [°C] | T60 [°C] | T110 [°C] | v10 [m/s] | v60 [m/s] | v110 [m/s] | Top [°C] |
|-------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
| Stazione 1 | 18,81 | 18,93 | 19,23 | 0,1586 | 0,0749 | 0,05283 | 19,19 |
| Stazione 2 | 18,95 | 19,03 | 19,18 | 0,1047 | 0,0925 | 0,09273 | 19,14 |
| Stazione 3 | 18,64 | 18,64 | 18,85 | 0,1594 | 0,1161 | 0,08135 | 18,98 |
| Stazione 4 | 18,62 | 18,54 | 18,56 | 0,1748 | 0,1852 | 0,16604 | 18,78 |
| Stazione 5 | 18,83 | 18,79 | 18,83 | 0,2626 | 0,2254 | 0,18018 | 19,01 |
| Stazione 6 | 18,86 | 18,85 | 18,99 | 0,2828 | 0,2476 | 0,18438 | 19,06 |
| Stazione 7 | 18,75 | 18,76 | 18,89 | 0,1983 | 0,1482 | 0,12342 | 19,01 |
| Stazione 8 | 18,910 | 18,92 | 18,95 | 0,1444 | 0,1232 | 0,13582 | 19,07 |
| Stazione 9 | 18,85 | 18,82 | 18,88 | 0,1189 | 0,1408 | 0,13197 | 19,01 |

Tabella 5.2: impianto acceso con portata =2400 m³/h (valori medi per 10 minuti di monitoraggio)

Dalla tabella si nota come le temperature interne, con una temperatura di mandata di 20°C, si mantengano circa a 18°C. Per quanto riguarda la distribuzione delle velocità dell'aria all'interno dell'ambiente occupato, si nota come queste aumentino sensibilmente nelle zone al di sotto dei canali microforati.

5.1.2 MONITORAGGIO CON I RECUPERATORI TERMODINAMICI SPENTI

Le misure riportate nella tabella sottostante sono state effettuate con il recuperatore termodinamico spento, quindi nell'aula è presente solo l'impianto preesistente con portata pari a 988 m³/h.

Nella tabella seguente, analogamente a quella riportata nella pagina precedente vengono presentati i valori di temperatura e velocità, riferiti rispettivamente alle caviglie, busto e testa. T, v "204" (caviglie); T, v "205" (busto); T, v "207" (testa).

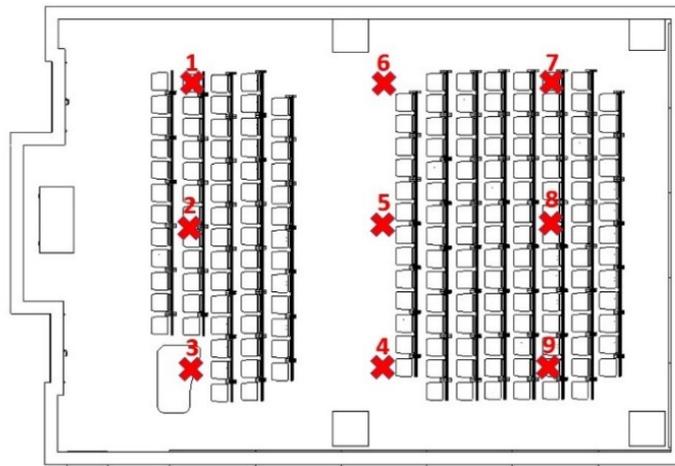


Figura 5.3: planimetria dell'aula S3 con la disposizione delle stazioni

| STAZIONI | T10 [°C] | T60 [°C] | T110 [°C] | v10 [m/s] | v60 [m/s] | v110 [m/s] | Top [°C] |
|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
| Stazione 1 | 18,79 | 18,77 | 18,87 | 0,12 | 0,12 | 0,10 | 19,07 |
| Stazione 2 | 18,99 | 18,95 | 18,96 | 0,0669 | 0,0728 | 0,0944 | 19,05 |
| Stazione 3 | 18,94 | 18,78 | 18,83 | 0,060 | 0,09 | 0,09 | 19,03 |
| Stazione 4 | 18,83 | 18,82 | 18,96 | 0,090 | 0,07491 | 0,0628 | 19,03 |
| Stazione 5 | 18,66 | 18,74 | 18,92 | 0,1507 | 0,1040 | 0,0825 | 19,05 |
| Stazione 6 | 18,97 | 18,87 | 18,91 | 0,049 | 0,07830 | 0,0845 | 19,03 |
| Stazione 7 | 18,76 | 18,75 | 18,85 | 0,080 | 0,06 | 0,07 | 18,86 |
| Stazione 8 | 18,73 | 18,71 | 18,67 | 0,050 | 0,04 | 0,07 | 18,78 |
| Stazione 9 | 18,47 | 18,60 | 18,76 | 0,074 | 0,0445 | 0,0444 | 18,63 |

Tabella 5.4: Impianto spento (valori medi per 10 minuti di monitoraggio)

Anidride carbonica:

Analogamente sono stati determinati e riportati nella tabella sottostante i valori medi di anidride carbonica di ciascuna stazione.

| STAZIONI | Valori CO ₂ Portata=1200 [m ³ /h] | Valori CO ₂ impianto spento |
|------------|---|--|
| Stazione 1 | 499,35 ppm | 511,69 ppm |
| Stazione 2 | 515,69 ppm | 514,64 ppm |
| Stazione 3 | 519,36 ppm | 512,25 ppm |
| Stazione 4 | 512,39 ppm | 512,48 ppm |
| Stazione 5 | 514,84 ppm | 518,20 ppm |
| Stazione 6 | 510,76 ppm | 511,61 ppm |
| Stazione 7 | 516,23 ppm | 506,67 ppm |
| Stazione 8 | 509,88 ppm | 512,78 ppm |
| Stazione 9 | 508,54 ppm | 523,42 ppm |

Tabella 5.5: valori di anidride carbonica nei due scenari per 10 minuti di monitoraggio

Confrontando i valori di CO₂ ad impianto acceso e ad impianto spento, si nota come la ventilazione aggiunta dal recuperatore termodinamico, rispetto all'impianto preesistente, riesca in concreto a determinare una diminuzione seppur contenuta della concentrazione di CO₂, specie nella zona in fondo all'aula.

Per quanto riguarda la CO₂ per avere il comfort all'interno dell'ambiente non bisogna superare il limite di 1000 ppm, come viene previsto nella norma DIN 1946-6, la quale prevede un flusso di aria esterno di 30 m³/h a persona.

Umidità relativa:

| STAZIONI | Relative Humidity Portata=1200 [m ³ /h] | Relative Humidity impianto spento |
|------------|--|-----------------------------------|
| Stazione 1 | 64,88 % | 65,45 % |
| Stazione 2 | 64,66 % | 65,68 % |
| Stazione 3 | 65,01 % | 65,80 % |
| Stazione 4 | 65,32 % | 65,62 % |
| Stazione 5 | 64,33 % | 65,34 % |
| Stazione 6 | 64,73 % | 64,83 % |
| Stazione 7 | 65,84 % | 65,00 % |
| Stazione 8 | 66,15 % | 66,03 % |
| Stazione 9 | 65,43 % | 66,53 % |

Tabella 5.6: valori di umidità relativa nei due scenari per 10 minuti di monitoraggio

Per quanto riguarda i valori di umidità relativa non ci sono differenze sostanziali tra l'impianto acceso e l'impianto spento, essi si mantengono pressoché costanti (circa il 65%) per tutta la durata delle misurazioni.

Predicted Mean Vote (Voto Medio Previsto)

| STAZIONI | PMV Portata = 1200 [m ³ /h] | PMV impianto spento |
|------------|--|---------------------|
| Stazione 1 | -1,007 | -1,015 |
| Stazione 2 | -1,000 | -1,080 |
| Stazione 3 | -1,111 | -1,040 |
| Stazione 4 | -1,308 | -1,017 |
| Stazione 5 | -1,336 | -1,063 |
| Stazione 6 | -1,359 | -1,014 |
| Stazione 7 | -1,163 | -1,070 |
| Stazione 8 | -1,098 | -1,070 |
| Stazione 9 | -1,141 | -1,096 |

Tabella 5.7: valori di umidità relativa nei due scenari per 10 minuti di monitoraggio

Il parametro del Predicted Mean Vote deriva dagli studi di Povl Ole Fanger mediante i suoi esperimenti condotti mediante una camera climatica al fine di capire come potesse variare il comfort degli occupanti all'interno di un ambiente.

Il PMV varia da -3 a +3, da una sensazione di molto freddo fino ad una di molto caldo. Per quanto riguarda il comfort ad impianto acceso con la portata massima si nota un PMV medio di -1, quindi esso corrisponderebbe ad una sensazione di fresco da parte degli utenti, ma le misure effettuate nello scenario in esame non tengono in considerazione l'eventuale presenza di studenti durante le ore di lezione e quindi eventuali apporti gratuiti.

I valori più sfavorevoli per quanto riguarda il Predicted Mean Vote sono stati misurati nella parte centrale dell'aula, dove vi è lo spazio per il passaggio di persone e non vi sono banchi.

5.1.3 CONFRONTO TRA IMPIANTO ACCESO E IMPIANTO SPENTO

Si confrontano qui di seguito i valori oggetto di monitoraggio, si confronteranno le velocità [m/s] e le concentrazioni di anidride carbonica [ppm].

Il primo scenario prevede che i due recuperatori termodinamici Aermec RTD11 siano in funzione, con una portata d'aria complessiva di 2400 [m³/h].

Il secondo scenario prevede invece l'assenza del recuperatore termodinamico ma è comunque presente una ventilazione minima che viene fornita dall'impianto preesistente (presentato nel Capitolo dedicato alla descrizione dell'impianto).

Per quanto riguarda le altre grandezze misurate non possono essere oggetto di confronto tra i due scenari, in quanto i due monitoraggi (ad impianto acceso e ad impianto spento) sono stati effettuati a distanza di circa un'ora. Pertanto le condizioni esterne (irraggiamento e temperatura esterna) variano e quindi il confronto sarebbe inficiato da tali variazioni.

5.1.4 VELOCITÀ DELL'ARIA ALL'INTERNO DELL'AULA S3

Qui di seguito si mostrano graficamente le differenze tra l'accensione e lo spegnimento del recuperatore termodinamico.

Le misure sono state effettuate prima con i due recuperatori termodinamici in funzione, con una portata complessiva di 2400 m³/h.

Successivamente le misurazioni sono state effettuate dopo lo spegnimento dei recuperatori termodinamici, quindi la ventilazione presente all'interno dell'ambiente è riferita al solo funzionamento dell'impianto preesistente.

Per mostrare i risultati si è scelto di uniformare il confronto tra le stazioni ad un tempo pari a 480 secondi.

Al fine quindi di avere una lettura chiara delle differenze tra impianto acceso ed impianto spento si sovrappongono i grafici relativi ai due scenari presi in considerazione.

5.1.4.1 Stazione 1 (v10) - velocità dell'aria

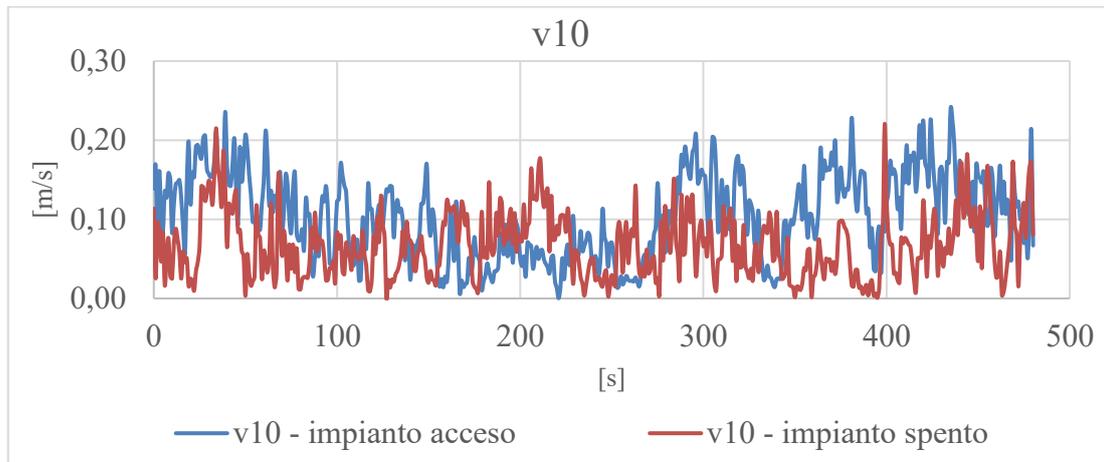


Grafico 5.8: stazione 1, velocità dell'aria a 10 cm dal pavimento

La velocità dell'aria ad un'altezza di 10 cm dal pavimento quando i recuperatori termodinamici sono accesi presenta una maggiorazione di circa 0,10 m/s rispetto allo scenario in cui l'impianto non sia acceso.

5.1.4.2 Stazione 1 (v60) - velocità dell'aria

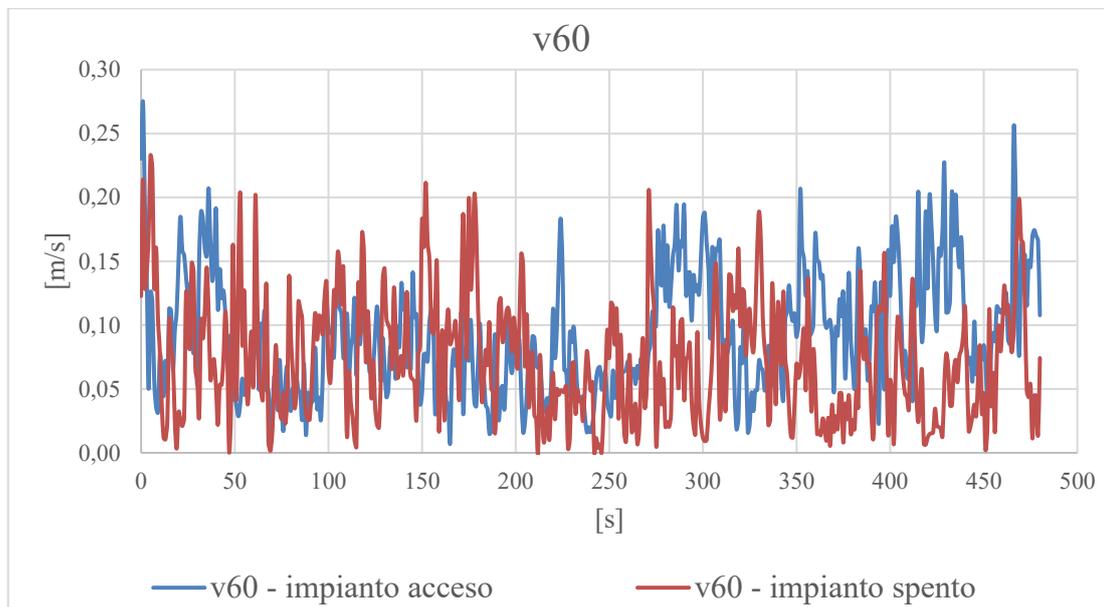


Grafico 5.9: stazione 1, velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento

Ad un'altezza dal pavimento superiore, complice anche la vicinanza dall'immissione dell'aria in ambiente attraverso i canali microforati, si nota un aumento delle velocità dell'aria.

5.1.4.3 Stazione 1 (v110) - velocità dell'aria

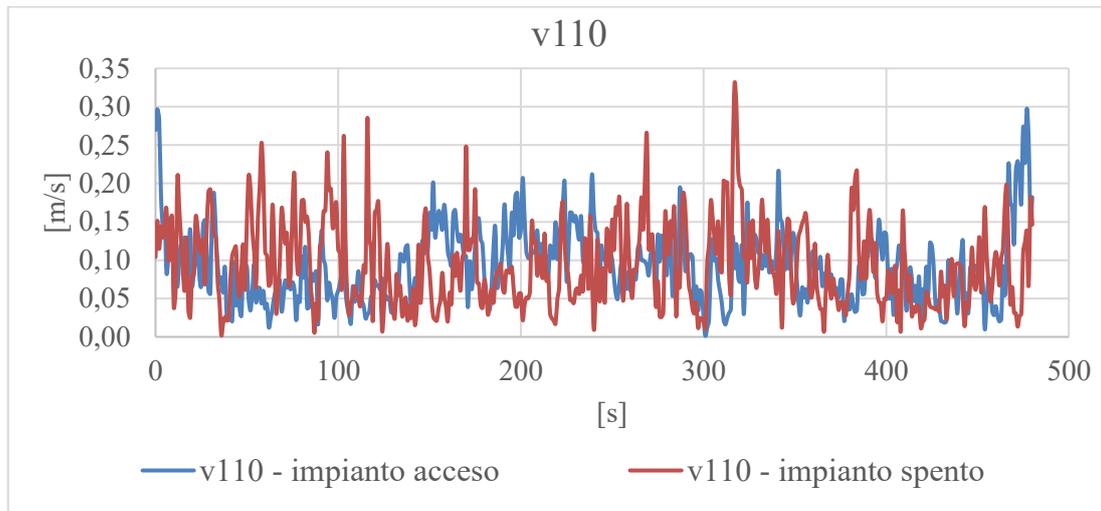


Grafico 5.10: stazione 1, velocità dell'aria a 110 cm dal pavimento

Per quanto riguarda la velocità dell'aria ad un'altezza di 110 cm dal pavimento si notano valori analoghi nei due scenari, i valori sono compresi tra un minimo di 0 m/s ed un massimo di 0,34 m/s.

5.1.4.4 Stazione 2 (v10) - velocità dell'aria

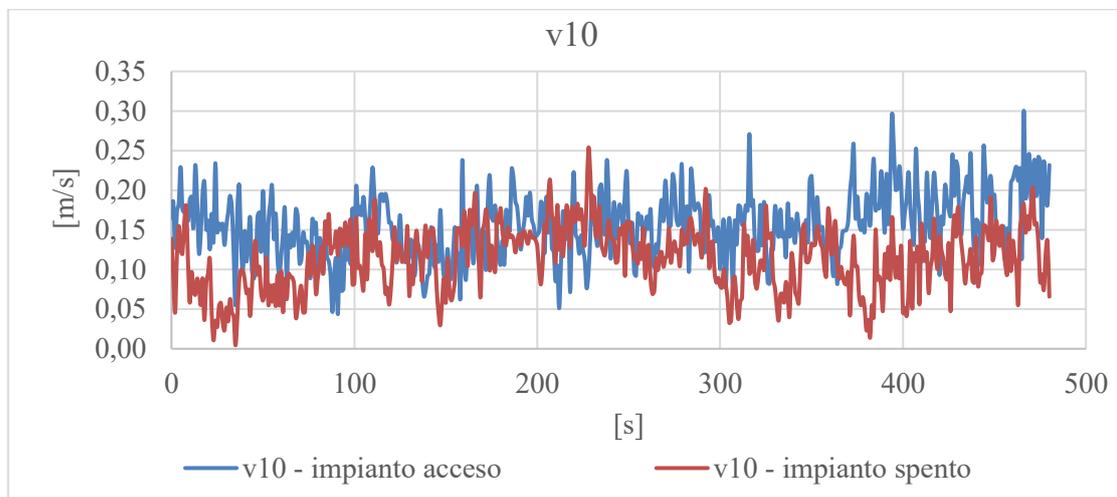


Grafico 5.11: stazione 2, velocità dell'aria a 10 cm dal pavimento

La velocità dell'aria nella zona a 10 cm dal pavimento non mostra sostanziali differenze dalla misurazione dell'analogo v204 relativa alla prima stazione di misura, i valori restano compresi in un range di 0,05 m/s e 0,20 m/s; con valori massimi che raggiungono 0,30 m/s.

5.1.4.5 Stazione 2 (v60) - velocità dell'aria

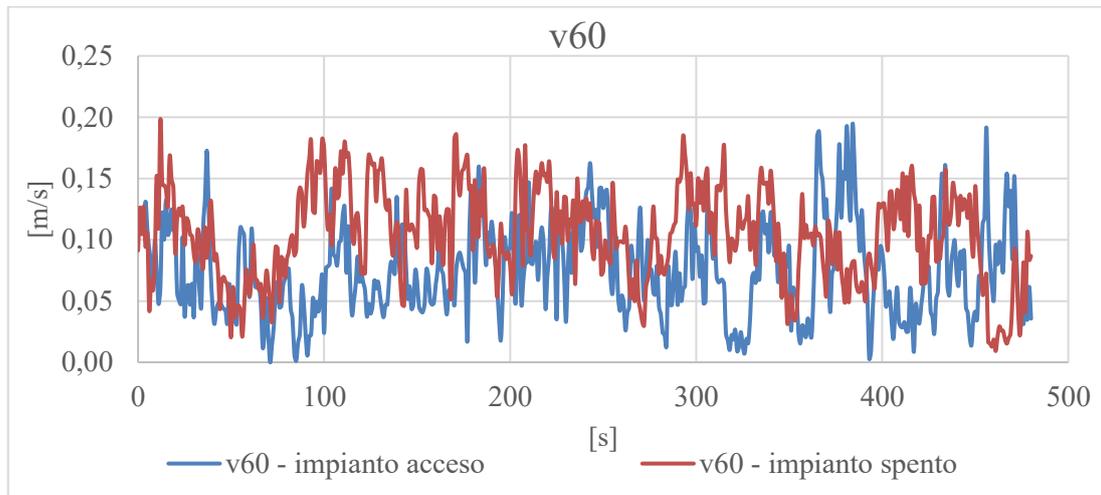


Grafico 5.12: stazione 2, velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento

La velocità dell'aria nella zona a 60 cm dal pavimento mostra un andamento con molteplici variazioni, sia ad impianto acceso che ad impianto spento. La curva blu subisce variazioni in un range compreso tra 0,025 m/s e 0,15 m/s.

5.1.4.6 Stazione 2 (v110) - velocità dell'aria

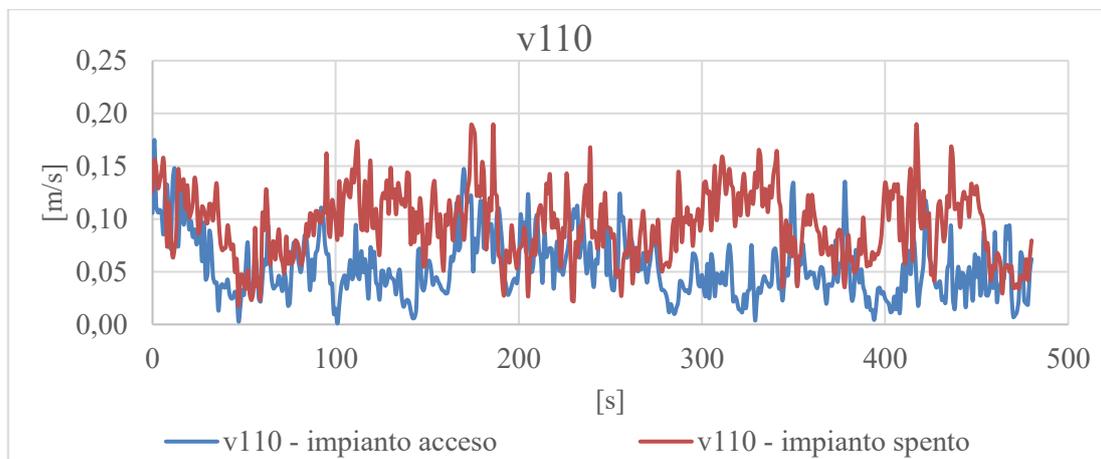


Grafico 5.13: stazione 2, velocità dell'aria a 110 cm dal pavimento

Confrontando la velocità dell'aria misurata dal sensore posto a 110 cm dal pavimento ad impianto acceso e ad impianto spento non si notano variazioni degne di nota. I valori di velocità sono contenuti in entrambi gli scenari, con valori massimi di quasi 0,20 m/s per quanto riguarda l'impianto spento.

5.1.4.7 Stazione 3 (v10) - velocità dell'aria

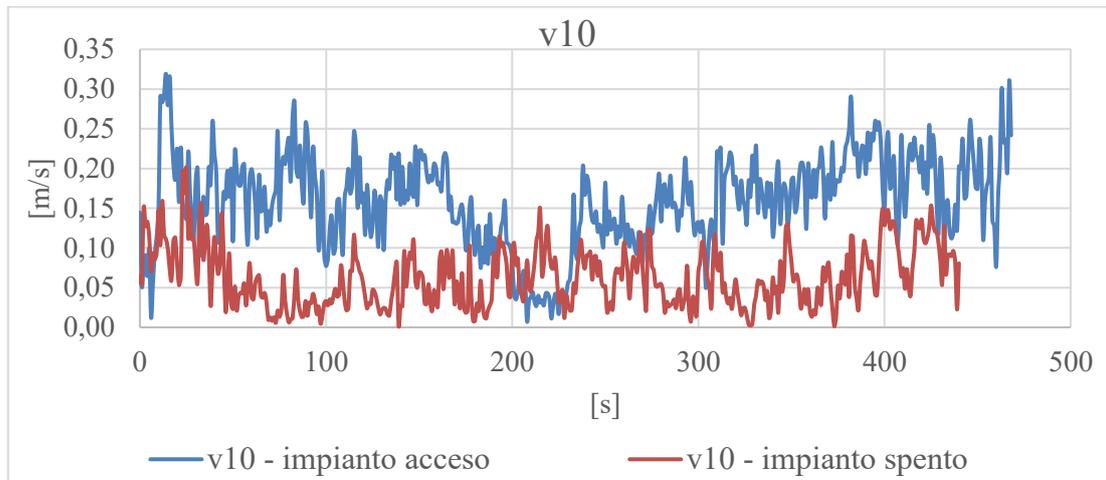


Grafico 5.14: stazione 3, velocità dell'aria a 10 cm dal pavimento

Le velocità relative alla terza stazione presentano valori maggiori nel caso relativo alla presenza dei recuperatori termodinamici, i valori presentano un'escursione che varia da un minimo di 0,02 m/s fino ad un massimo di 0,33 m/s.

5.1.4.8 Stazione 3 (v60) - velocità dell'aria

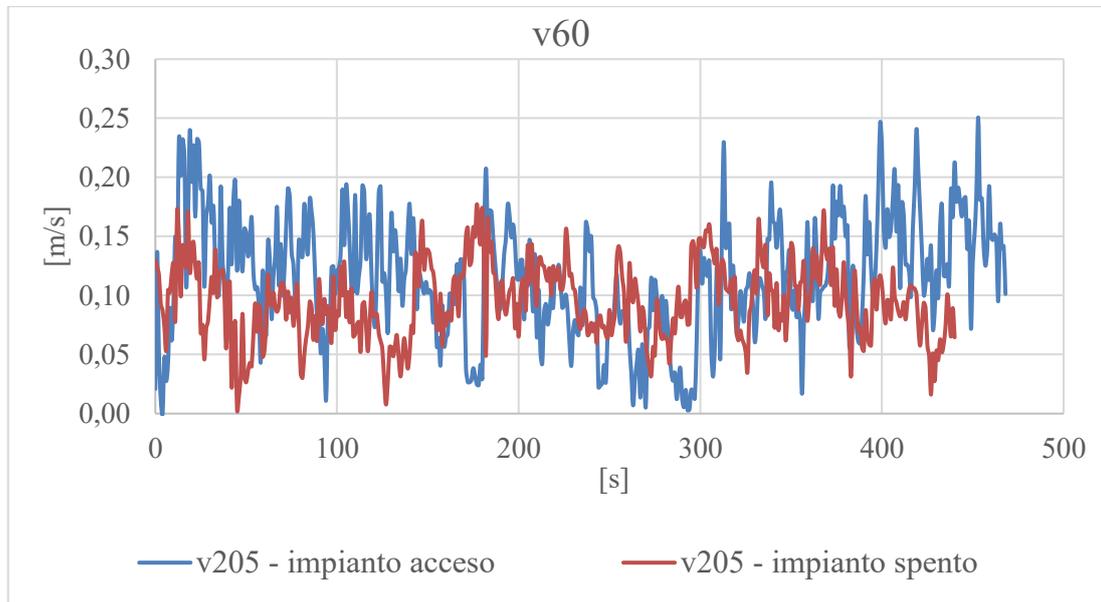


Grafico 5.15: stazione 3, velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento

La velocità dell'aria monitorata a 60 cm dal pavimento presenta valori maggiori nello scenario relativo all'impianto acceso, con valori che presentano una maggiorazione di circa 0,10 m/s rispetto al caso in cui i recuperatori termodinamici sono spenti.

5.1.4.9 Stazione 3 (v110) - velocità dell'aria

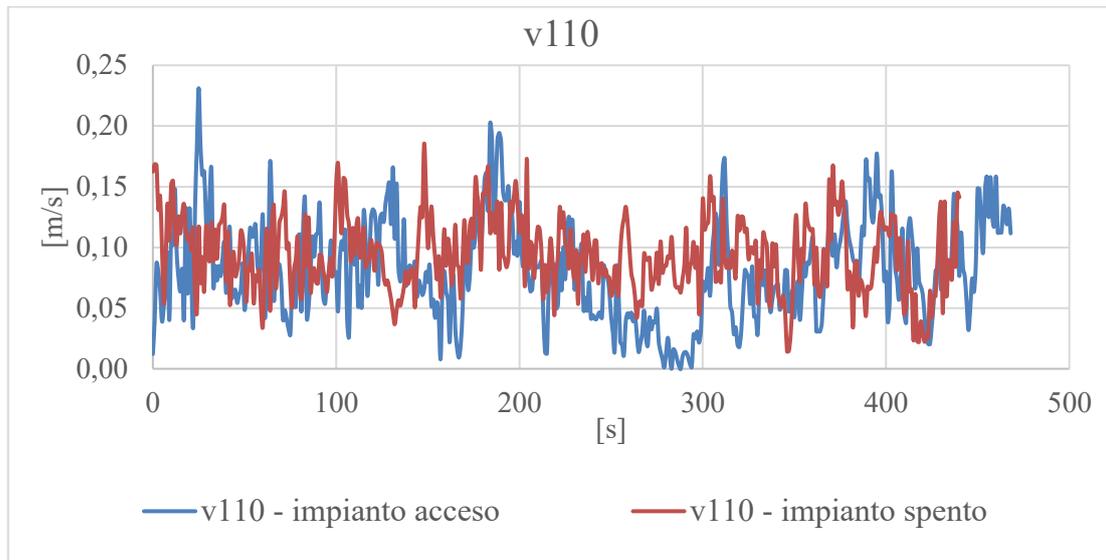


Grafico 5.16: stazione 3, velocità dell'aria a 110 cm dal pavimento

La velocità a 110 cm dal pavimento non mostra differenze significative tra i due scenari presi in esame, il range di variazione di entrambe le curve è mediamente lo stesso; vi sono alcuni picchi in cui la curva blu (relativa alla presenza dei recuperatori termodinamici) raggiunge valori di circa 0,23 m/s.

5.1.4.10 Stazione 4 (v10) - velocità dell'aria

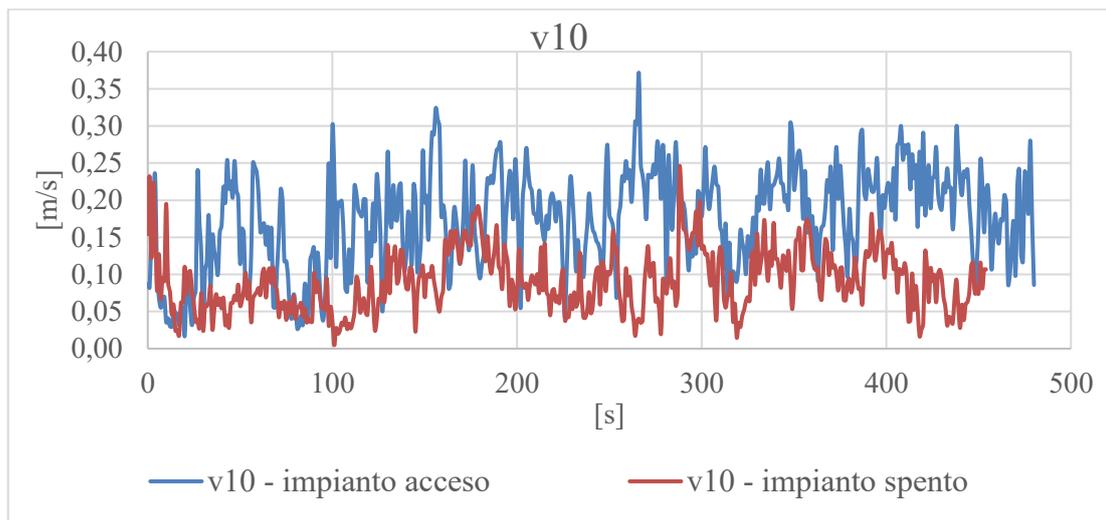


Grafico 5.20: stazione 4, velocità dell'aria a 10 cm dal pavimento

La velocità dell'aria misurata dal sensore a 10 cm dal pavimento mostra un aumento della velocità dell'aria ad impianto acceso di circa 0,10 m/s, con un valore massimo di 0,35 m/s misurato a circa metà del monitoraggio.

5.1.4.11 Stazione 4 (v60) - velocità dell'aria

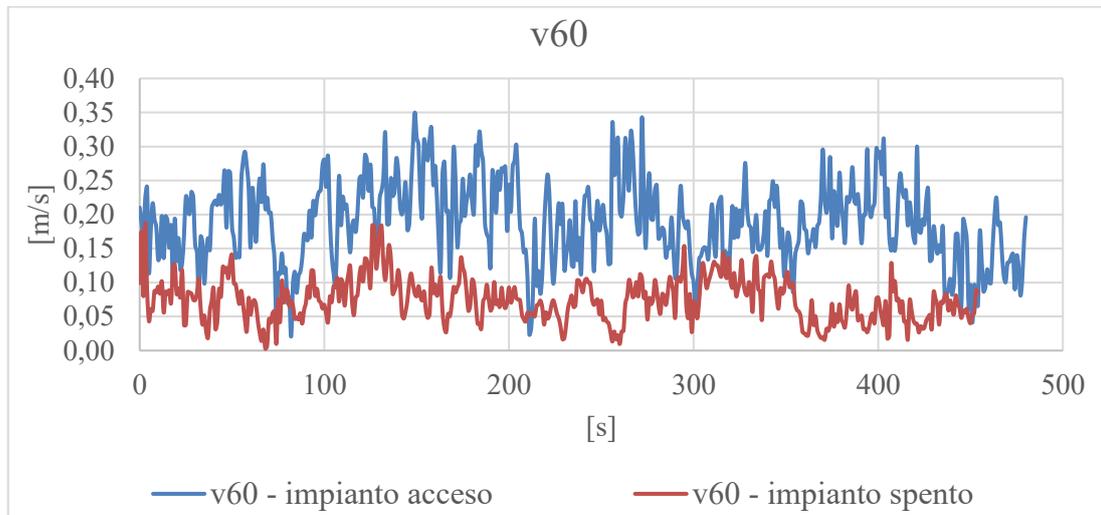


Grafico 5.21: stazione 4, velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento

La velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento presenta valori maggiori nel caso relativo all'impianto acceso, l'andamento è mediamente compreso tra 0,15 m/s e 0,35 m/s. La curva rossa, relativa all'impianto spento, presenta valori mediamente più contenuti, tra 0 m/s e 0,15 m/s.

5.1.4.12 Stazione 4 (v110) - velocità dell'aria

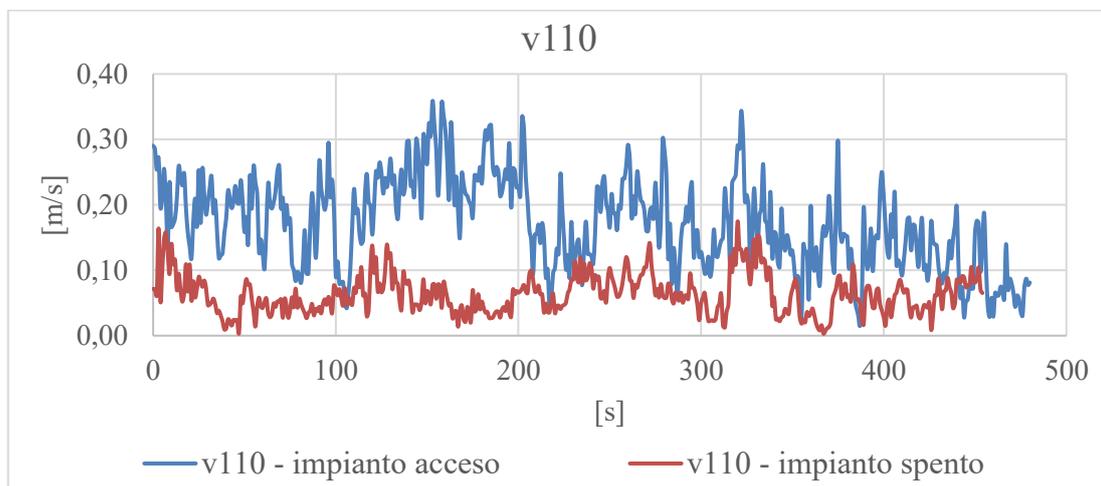


Grafico 5.22: stazione 4, velocità dell'aria a 110 cm dal pavimento

Nella quarta stazione la velocità assume valori più contenuti per quanto riguarda il caso relativo all'impianto spento.

5.1.4.13 Stazione 5 (v10) - velocità dell'aria

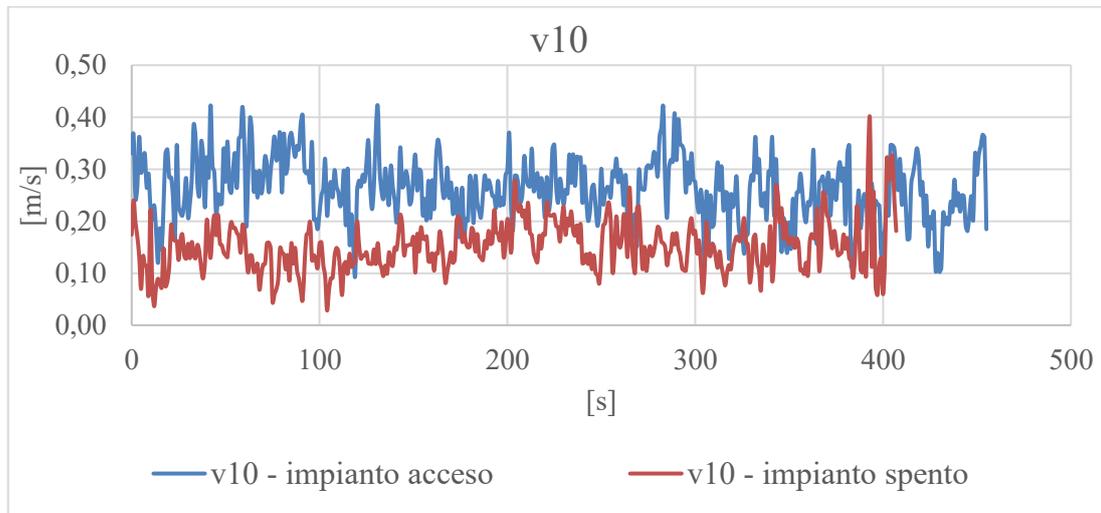


Grafico 5.23: stazione 5, velocità dell'aria a 10 cm dal pavimento

Per quanto riguarda i valori di velocità riferiti ad un'altezza di 10 cm dal pavimento si notano valori maggiori di circa 0,20 m/s quando i recuperatori termodinamici sono in funzione.

5.1.4.14 Stazione 5 (v60) - velocità dell'aria

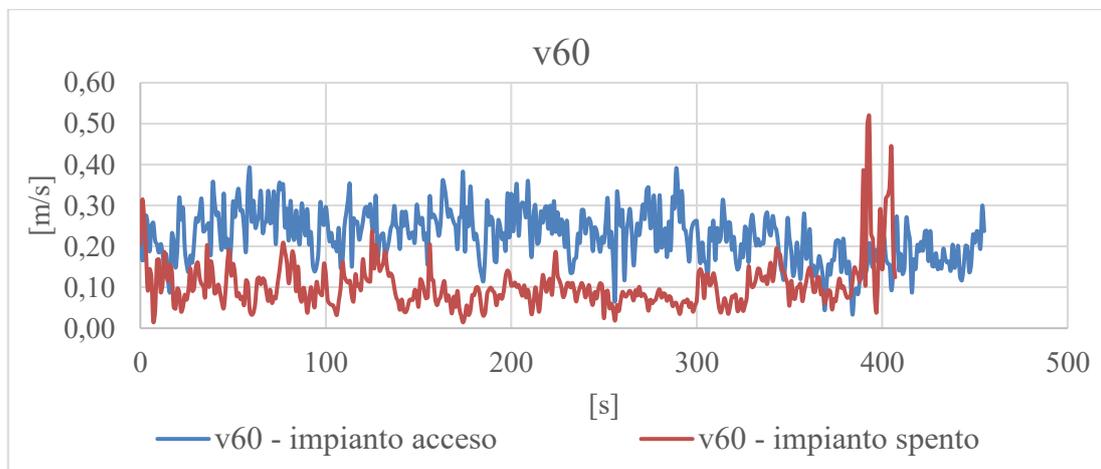


Grafico 5.24: stazione 5, velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento

I valori misurati a 60 cm dal pavimento sono maggiori nel caso relativo all'impianto acceso. Per quanto riguarda l'impianto spento si nota un picco a circa 400 secondi di monitoraggio, probabilmente dovuto ad una corrente d'aria; in quanto i valori erano già stati filtrati per eliminare le misure durante gli spostamenti del treppiede durante il cambio di stazione.

5.1.4.15 Stazione 5 (v110) - velocità dell'aria

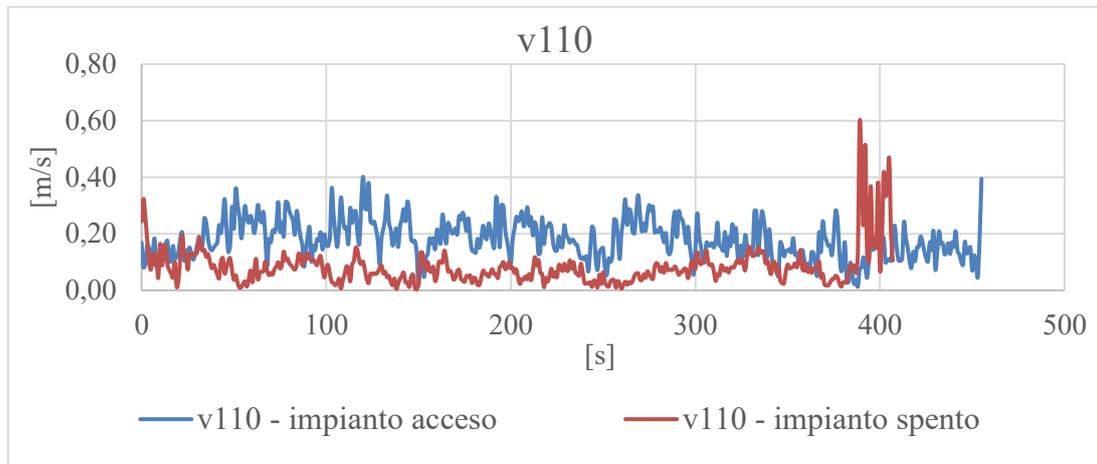


Grafico 5.25: stazione 5, velocità dell'aria a 110 cm dal pavimento

Un comportamento pressoché analogo si ha confrontando i valori dei due scenari per quanto riguarda i valori misurati a 110 cm dal pavimento. A 400 secondi di misurazione per quanto riguarda lo scenario relativo all'impianto spento si nota un picco di velocità, che arriva a circa 0,60 m/s, dovuta ad una presenza di turbolenza all'interno dell'ambiente.

5.1.4.16 Stazione 6 (v10) - velocità dell'aria

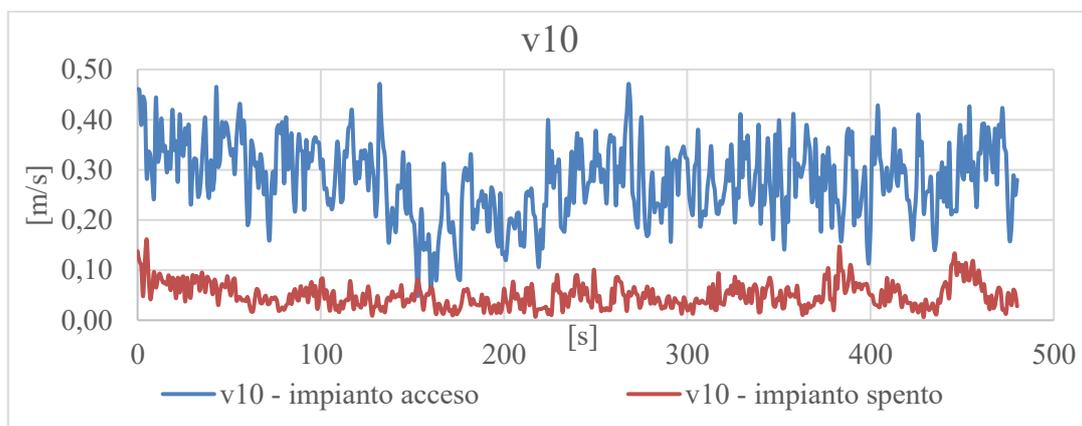


Grafico 5.26: stazione 6, velocità dell'aria a 10 cm dal pavimento

La velocità misurata a 10 cm dal pavimento presenta notevoli differenze tra i due scenari relativi alla presenza o meno dei recuperatori termodinamici. Nello specifico la curva blu (ad impianto acceso) presenta valori maggiori di circa 0,30 m/s, comprensibile data la movimentazione d'aria indotta dall'immissione in ambiente di aria di rinnovo da parte dei canali microforati.

5.1.4.17 Stazione 6 (v60) - velocità dell'aria

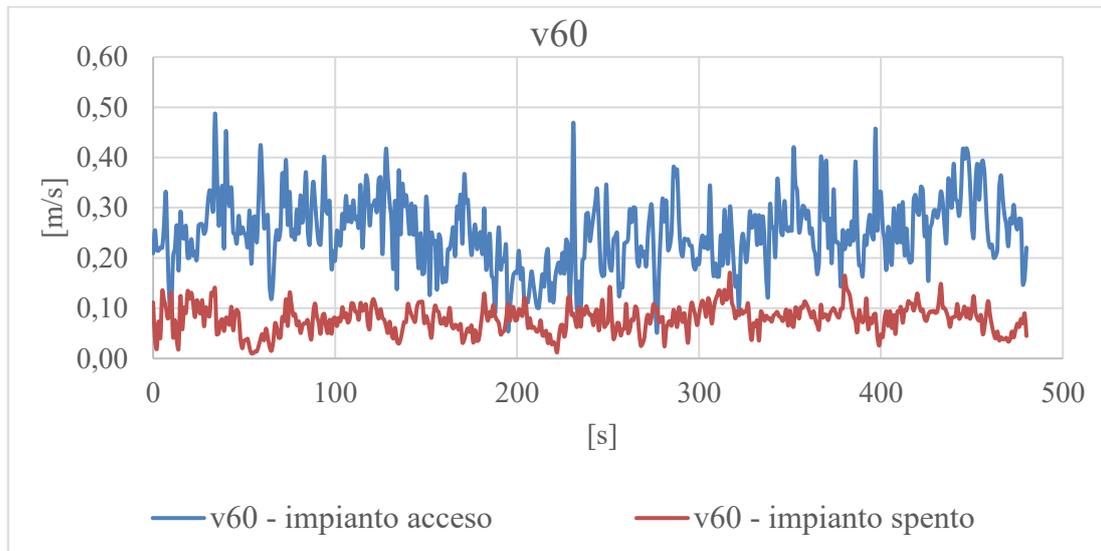


Grafico 5.27: stazione 6, velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento

I valori di velocità dell'aria misurati a 60 cm dal pavimento subiscono maggiorazioni nello scenario relativo alla presenza dei recuperatori termodinamici. Mediamente i valori si mantengono in un range compreso tra 0,15 m/s e 0,30 m/s. La curva rossa che fa riferimento allo scenario in cui i recuperatori termodinamici non sono in funzione si mantiene in un range compreso tra 0,05 m/s e 0,10 m/s.

5.1.4.18 Stazione 6 (v110) - velocità dell'aria

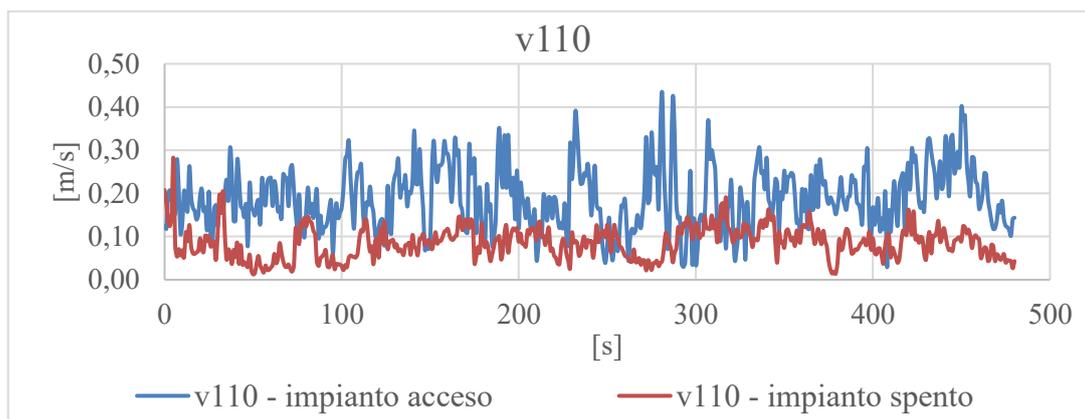


Grafico 5.28: stazione 6, velocità dell'aria a 110 cm dal pavimento

La velocità misurata a 110 cm dal pavimento mostra un andamento con variazioni contenute, la curva rossa, la quale fa riferimento ai recuperatori termodinamici spenti mostra variazioni tra un valore di 0,05 m/s fino ad un valore di 0,18 m/s, misurato a circa 320 secondi di monitoraggio.

5.1.4.19 Stazione 7 (v10) - velocità dell'aria

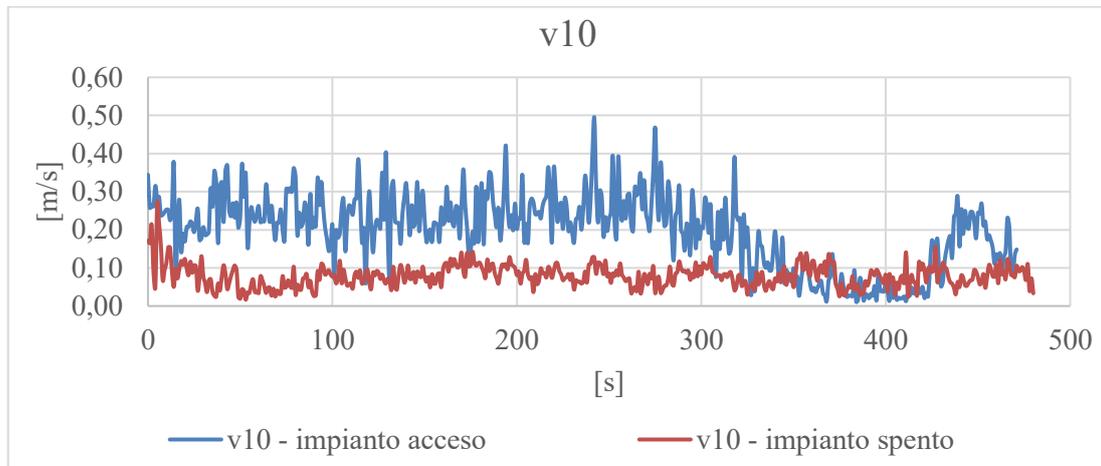


Grafico 5.29: stazione 7, velocità dell'aria a 10 cm dal pavimento

La curva blu, relativa ai recuperatori termodinamici in funzione si mantiene in un range compreso tra 0,18 m/s e 0,30 m/s nei primi 300 secondi di monitoraggio. Nei successivi 100 secondi vi è una diminuzione dei valori, fino a quasi 0 m/s, successivamente negli ultimi 100 secondi di misurazione si assiste ad un aumento dei valori fino a circa 0,30 m/s. La curva rossa ad impianto spento invece, si mantiene pressoché costante durante tutto il tempo di misurazione.

5.1.4.20 Stazione 7 (v60) - velocità dell'aria

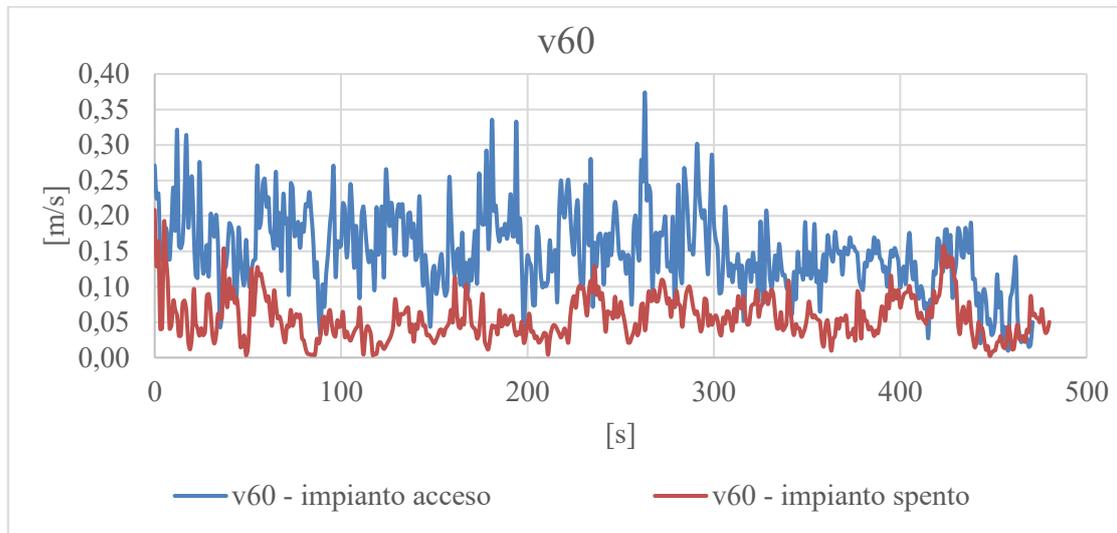


Grafico 5.30: stazione 7, velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento

La velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento presenta dei valori compresi tra 0 m/s e 0,15 m/s per quanto riguarda la curva rossa. Valori maggiori sono stati invece osservati durante il monitoraggio ad impianto acceso, la curva blu infatti assume valori compresi in un range tra 0,10 m/s e 0,25 m/s; con dei picchi massimi fino a 0,38 m/s.

5.1.4.21 Stazione 7 (v110) - velocità dell'aria

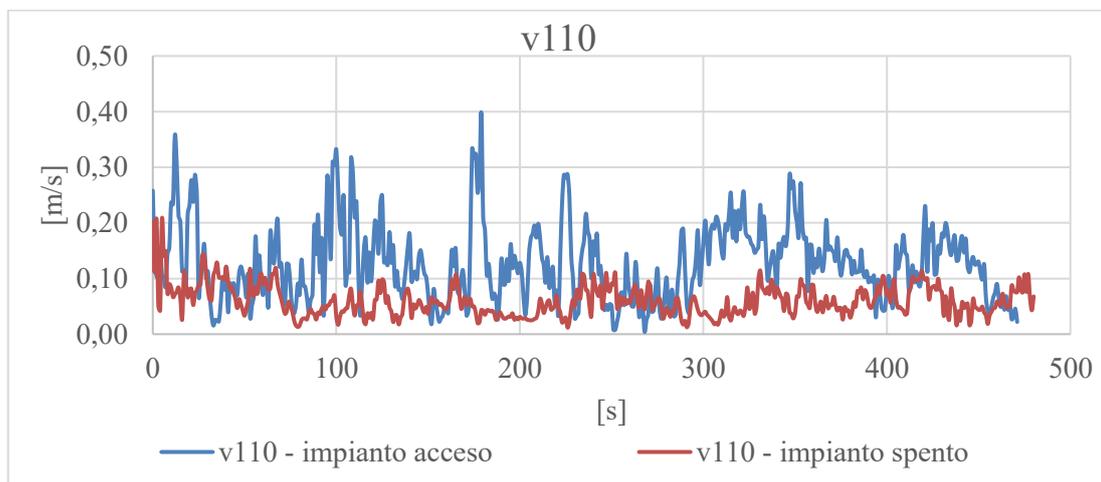


Grafico 5.31: stazione 7, velocità dell'aria a 110 cm dal pavimento

La velocità a 110 cm presenta valori contenuti per quanto riguarda l'impianto spento. L'impianto acceso, identificato nel grafico sovrastante con la curva blu presenta valori fino a circa 0,40 m/s dovuti presumibilmente ad una turbolenza all'interno dell'ambiente durante il tempo di monitoraggio.

5.1.4.22 Stazione 8 (v10) - velocità dell'aria

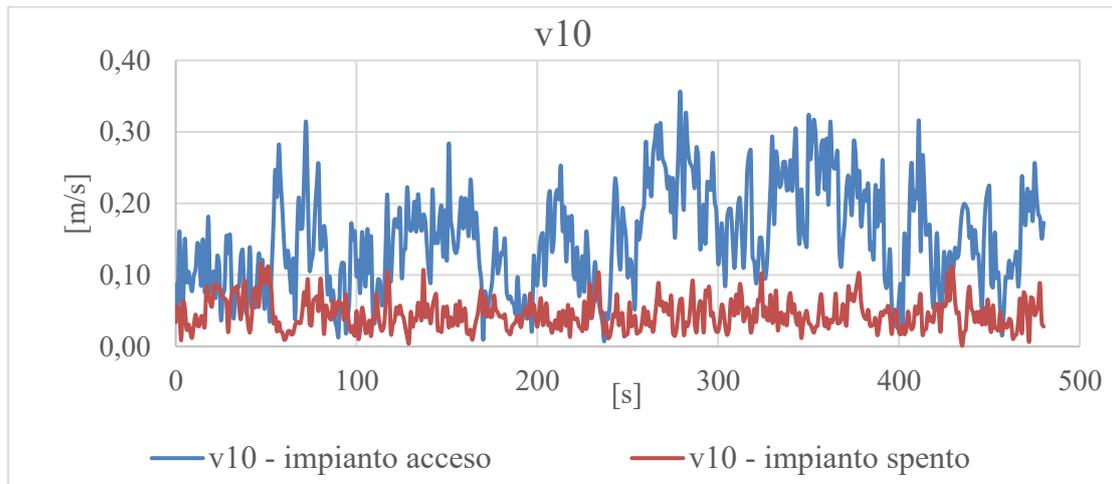


Grafico 5.32: stazione 8, velocità dell'aria a 10 cm dal pavimento

Nell'ottava stazione si nota un andamento pressoché costante della curva rossa relativa all'assenza dei recuperatori termodinamici. La curva blu presenta valori più elevati nell'ordine dei 0,20 m/s; con picchi accentuati dopo i 250 secondi di misurazione.

5.1.4.23 Stazione 8 (v60) - velocità dell'aria

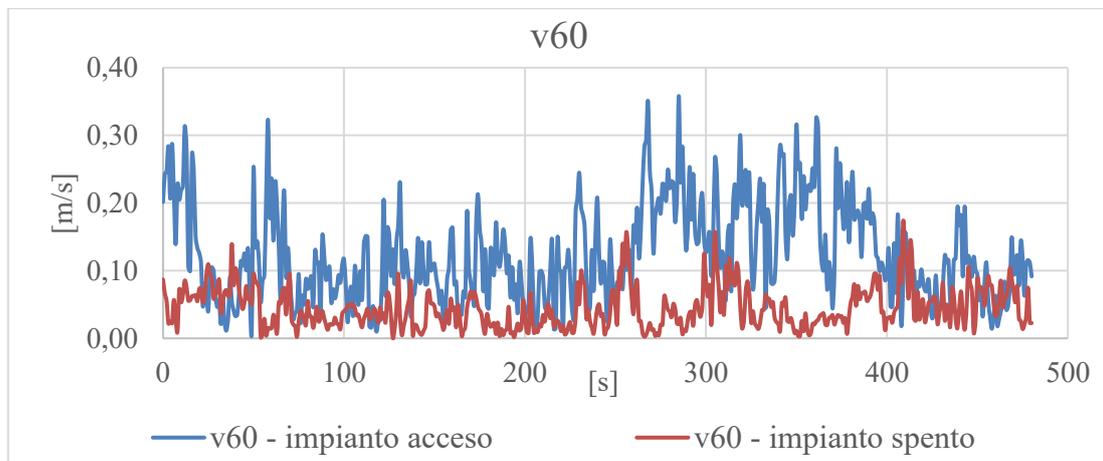


Grafico 5.33: stazione 8, velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento

La velocità relativa alla ottava stazione misurata a 60 cm dal pavimento presenta valori compresi tra 0 m/s e 0,15 m/s. La curva blu correlata alla presenza dei recuperatori termodinamici in funzione presenta un andamento compreso in un range tra 0,05 m/s e 0,35 m/s, dove i valori maggiori sono stati riscontrati dopo la seconda metà del monitoraggio.

5.1.4.24 Stazione 8 (v110) - velocità dell'aria

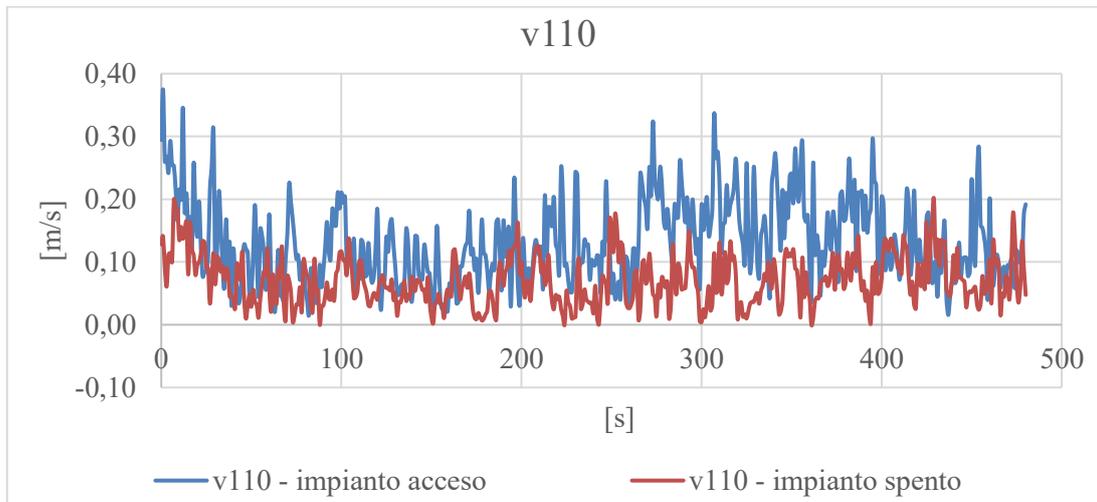


Grafico 5.34: stazione 8, velocità dell'aria a 110 cm dal pavimento

La curva rossa relativa allo scenario in cui i recuperatori termodinamici sono spenti presenta variazioni contenute in un range compreso tra 0 m/s e 0,20 m/s. La curva blu relativa all'impianto acceso mostra un aumento dei valori di velocità dell'aria, il range è compreso mediamente tra 0,02 m/s e 0,30 m/s; con alcuni picchi che arrivano a valori di circa 0,35 m/s.

5.1.4.25 Stazione 9 (v10) - velocità dell'aria

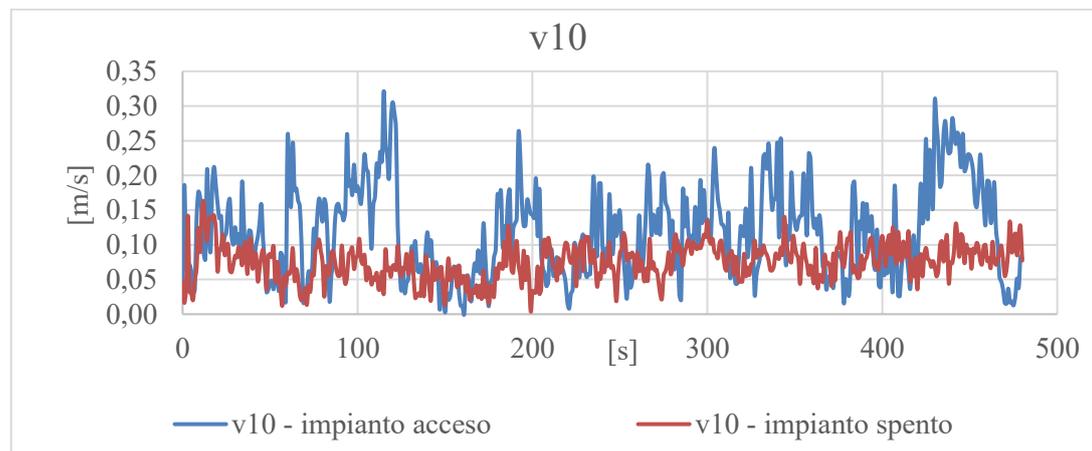


Grafico 5.35: stazione 9, velocità dell'aria a 10 cm dal pavimento

La nona stazione mostra un andamento pressoché costante dei valori di velocità dell'aria nel caso in cui i recuperatori termodinamici sono spenti. La curva blu al contrario mostra molteplici variazioni, con picchi di 0,30 m/s situati a 120 secondi e 420 secondi circa di monitoraggio.

5.1.4.26 Stazione 9 (v60) - velocità dell'aria

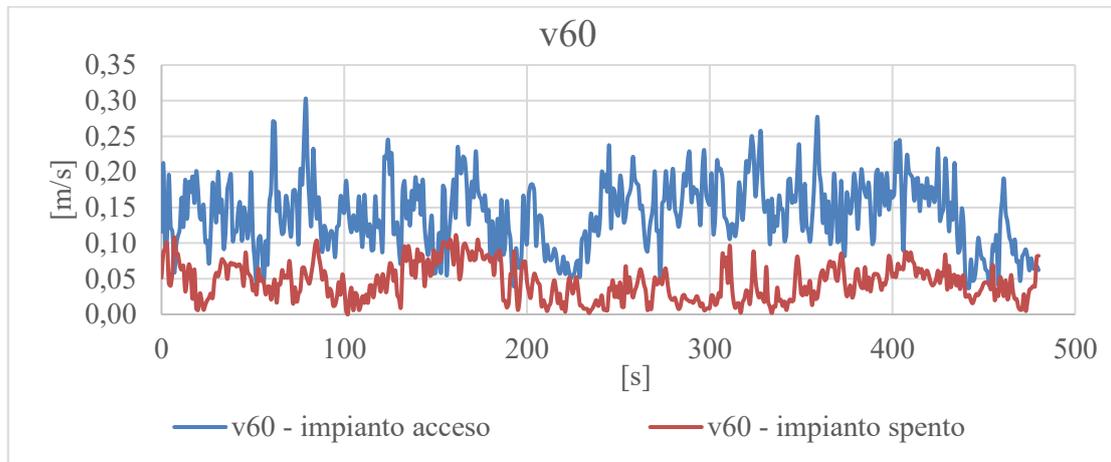


Grafico 5.36: stazione 9, velocità dell'aria a 60 cm dal pavimento

I valori a 60 cm dal pavimento presentano valori in linea con le misurazioni effettuate nella stessa stazione a 10 cm dal pavimento. La curva rossa mantiene il suo andamento in un range contenuto tra 0 m/s e 0,10 m/s. La curva blu, invece presenta valori maggiori di circa 0,15 m/s, rispetto allo scenario in cui la ventilazione fornita dai recuperatori è assente.

5.1.4.27 Stazione 9 (v110) - velocità dell'aria

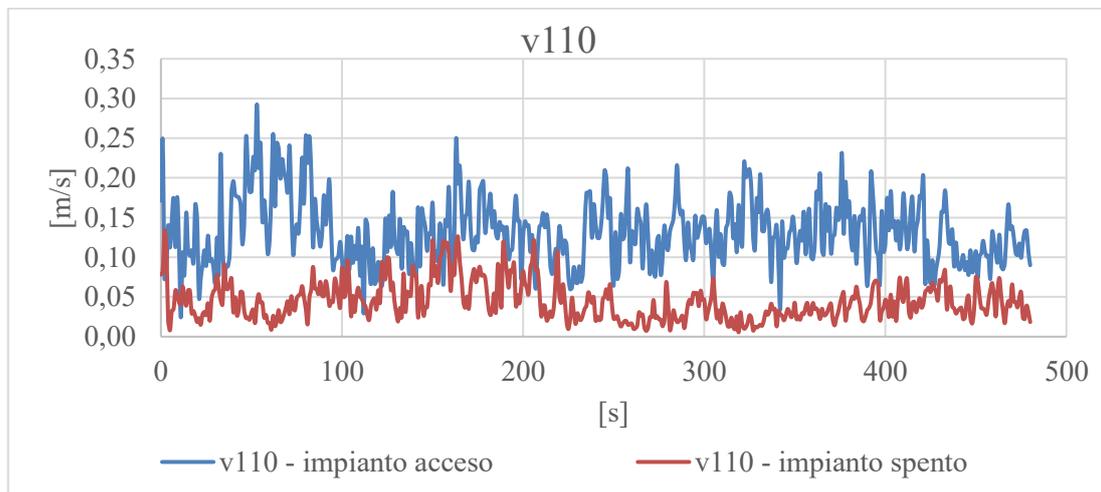


Grafico 5.37: stazione 9, velocità dell'aria a 110 cm dal pavimento

I valori misurati a 110 cm dal pavimento mostrano l'aumento dei valori di velocità dell'aria nello scenario in cui i recuperatori termodinamici sono in funzione. In tale scenario le velocità presentano una maggiorazione di circa 0,15 m/s.

5.1.5 DISTRIBUZIONE DELLA VELOCITÀ DELL'ARIA

Per rappresentare graficamente la distribuzione delle velocità dell'aria all'interno dell'aula S3 è stato utilizzato il software "Tecplot 360 EX".

È stata realizzata una tabella Excel: i valori presenti nella prima riga e nella prima colonna fanno riferimento alle quote dove sono state effettuate le stazioni.

| | 3 [m] | 7,1 [m] | 10,9 [m] |
|---------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1,5 [m] | Valore 1 ^a stazione | Valore 4 ^a stazione | Valore 7 ^a stazione |
| 5,2 [m] | Valore 2 ^a stazione | Valore 5 ^a stazione | Valore 8 ^a stazione |
| 8,4 [m] | Valore 3 ^a stazione | Valore 6 ^a stazione | Valore 9 ^a stazione |

Tabella 5.38: carpet per importazione dei dati nel software Tecplot 360 EX

I dati sono stati importati nel software come "carpet". La tabella quindi fornisce in input al software i valori medi di velocità dell'aria per 10 minuti di monitoraggio. Il software quindi poi ha effettuato un'interpolazione per fornire in output l'andamento delle velocità.

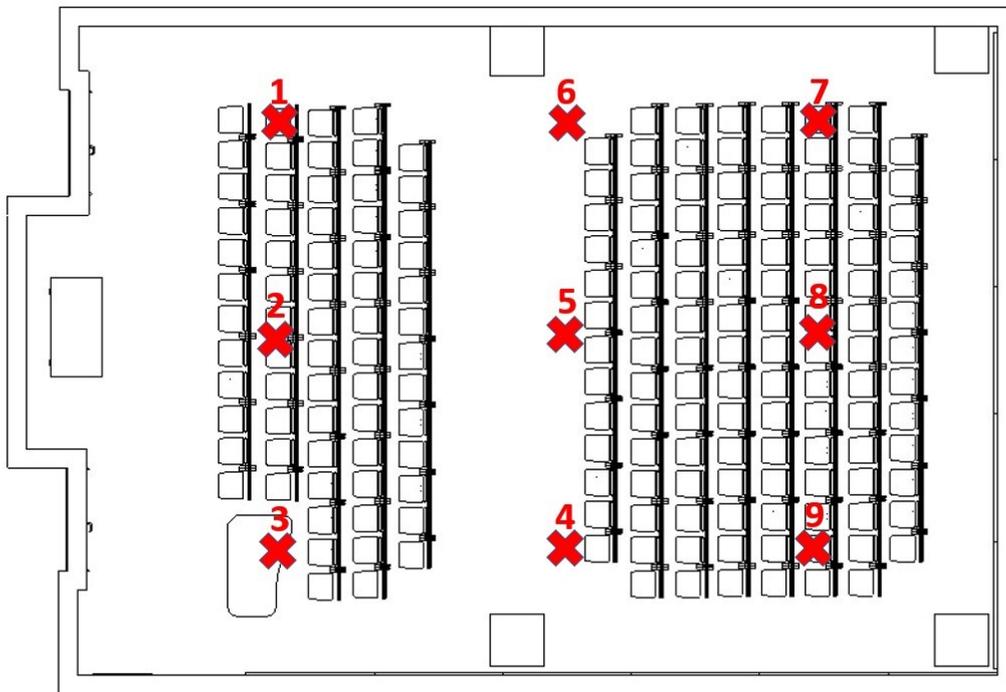


Figura 5.39: planimetria dell'aula con la disposizione delle stazioni effettuate

La distribuzione delle velocità fa riferimento ai due scenari presi in esame precedentemente:

- Recuperatori termodinamici accesi con portata massima (2400 m³/h)
- Recuperatori termodinamici spenti, ventilazione dovuta all'impianto preesistente (portata = 988 m³/h)

5.1.5.1 Distribuzione della velocità dell'aria v_{10} (impianto acceso)

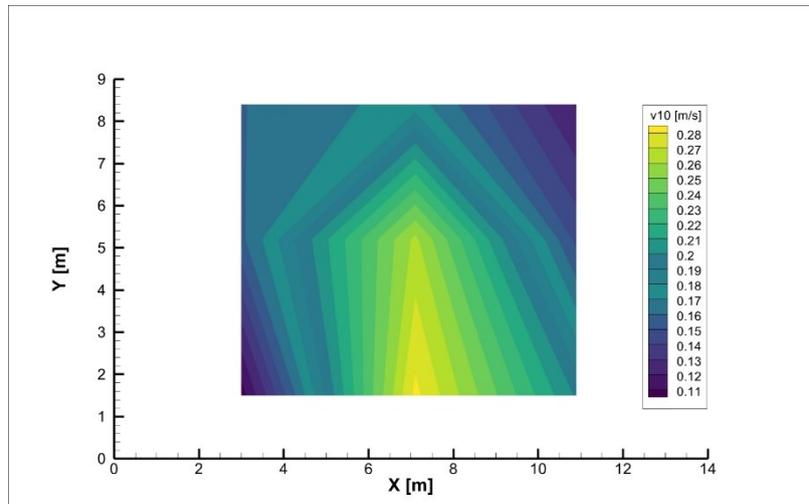


Figura 5.40: distribuzione della velocità dell'aria nell'aula S3 ad impianto acceso

La distribuzione media delle velocità nell'aula è compresa in un range tra 0,11 m/s e 0,28 m/s. Il valore maggiore di velocità dell'aria è stato misurato al centro dell'aula.

Si fa notare che la presenza dei banchi all'interno dell'aula modifica il flusso dell'aria, infatti, misure a 10 cm dal pavimento risultano maggiori nella zona in cui le postazioni degli studenti non sono presenti.

5.1.5.2 Distribuzione della velocità dell'aria v10 (impianto spento)

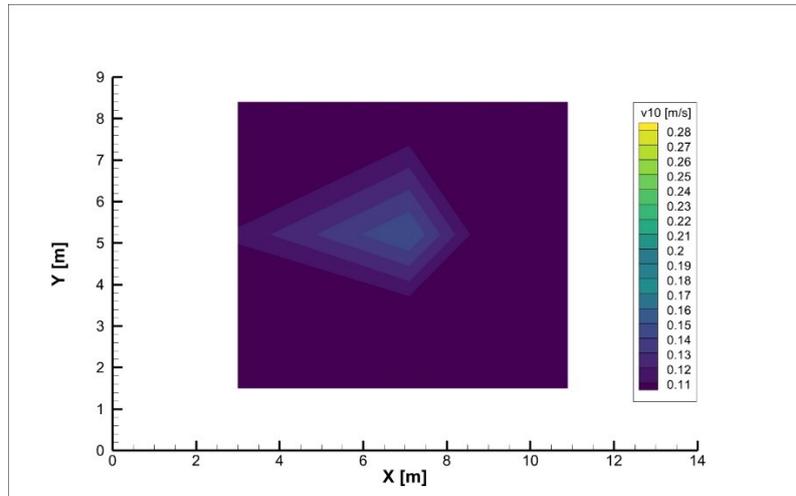


Figura 5.41: distribuzione della velocità dell'aria nell'aula S3 ad impianto spento

La distribuzione della velocità dell'aria nello scenario relativo all'impianto spento mostra un andamento compreso tra 0,04 m/s e 0,15 m/s. Dalla figura si può notare come i valori maggiori di velocità dell'aria siano compresi nell'intorno degli anemostati dell'impianto preesistente.

5.1.5.3 Distribuzione della velocità dell'aria v60 (impianto acceso)

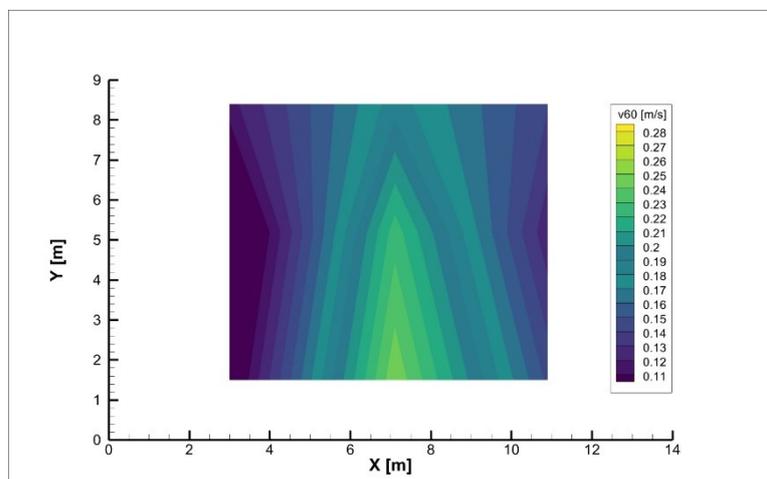


Figura 5.42: distribuzione della velocità dell'aria nell'aula S3 ad impianto acceso

La distribuzione della velocità dell'aria a 60 cm presenta valori maggiori al centro dell'aula nella porzione dove non sono presenti le postazioni dedicate agli studenti. I valori minori si riscontrano all'inizio e alla fine dell'aula.

5.1.5.4 Distribuzione della velocità dell'aria v60 (impianto spento)

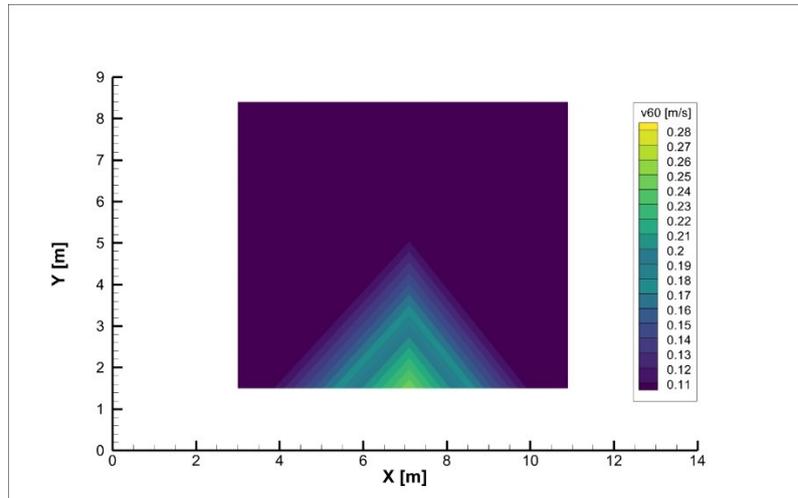


Figura 5.43: distribuzione della velocità dell'aria nell'aula S3 ad impianto spento

La velocità misurata a 60 cm dal pavimento invece presenta valori maggiori nella zona dell'aula adiacente agli infissi, dovuta probabilmente alle infiltrazioni d'aria.

5.1.5.5 Distribuzione della velocità dell'aria v110 (impianto acceso)

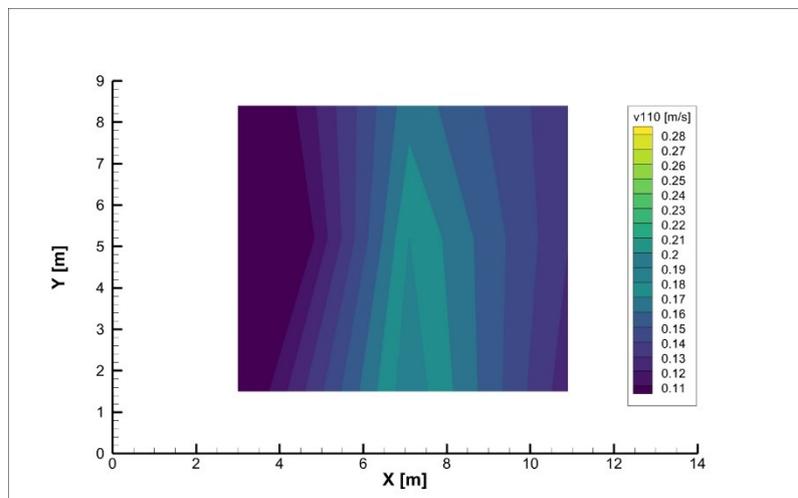


Figura 5.44: distribuzione della velocità dell'aria nell'aula S3 ad impianto acceso

I valori medi per 10 minuti di monitoraggio variano tra 0,05 m/s fino a 0,18 m/s. I valori sono riferiti alla distribuzione delle velocità a 60 cm dal pavimento ad impianto acceso varia in un range compreso tra 0,20 e 0,11 m/s.

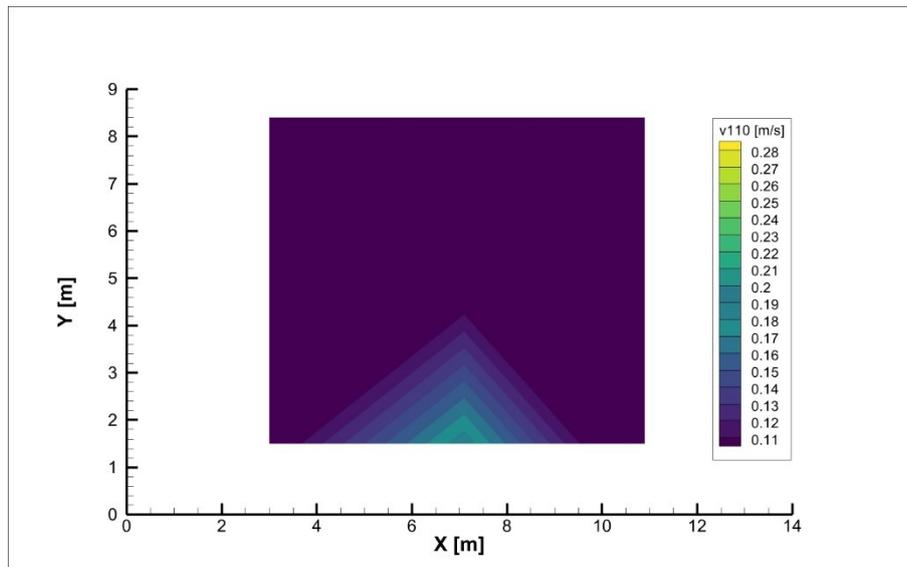
5.1.5.6 Distribuzione della velocità dell'aria v_{110} (impianto spento)

Figura 5.45: distribuzione della velocità dell'aria nell'aula S3 ad impianto spento

La velocità misurata a 110 cm dal pavimento, analogamente alla velocità a 60 cm dal pavimento, presenta valori maggiori nella zona dell'aula adiacente agli infissi, dovuta presumibilmente alle infiltrazioni d'aria.

5.1.5.7 Considerazioni sulla distribuzione della velocità

Bisogna tenere in considerazione che le velocità misurate ad impianto acceso con portata massima (2400 m³/h complessivi) presentano al centro dell'aula alcuni valori maggiori di 0,25 m/s (nel caso di v_{10} , e v_{60}). Pertanto bisogna considerare che, se le persone fossero senza mascherina, eventuali gocce potrebbero presentare una gittata maggiore.

Per quanto riguarda la velocità misurata a 110 cm dal pavimento si nota che i valori sono compresi tra 0,20 m/s e 0,11 m/s, quindi non dovrebbero presentare problemi dal punto di vista di aumenti della gittata.

5.1.6 CONCENTRAZIONI DI ANIDRIDE CARBONICA

5.1.6.1 Stazione 1 – Anidride carbonica

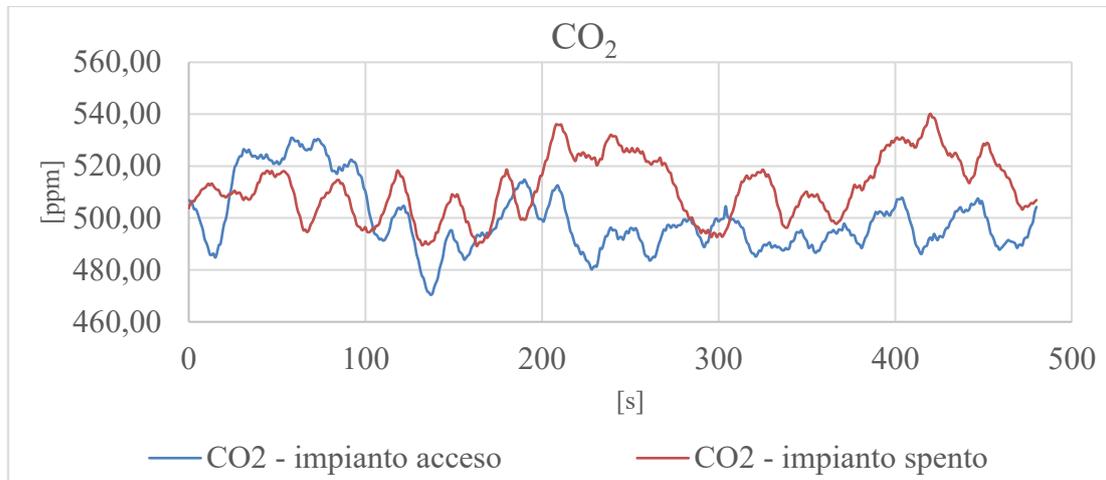


Grafico 5.46: stazione 1, concentrazione anidride carbonica

Nel grafico sopra sono riportate le misurazioni relative all'anidride carbonica all'interno dell'aula confrontando i due scenari. La situazione mostra la differenza tra il primo scenario, con i recuperatori termodinamici accesi (curva blu) e il secondo scenario, con i recuperatori termodinamici spenti (curva rossa). Per quanto riguarda le variazioni di CO₂ non si notano grandi variazioni tra l'impianto acceso e l'impianto spento, complice anche l'assenza degli studenti durante le rilevazioni.

5.1.6.2 Stazione 2 - Anidride carbonica

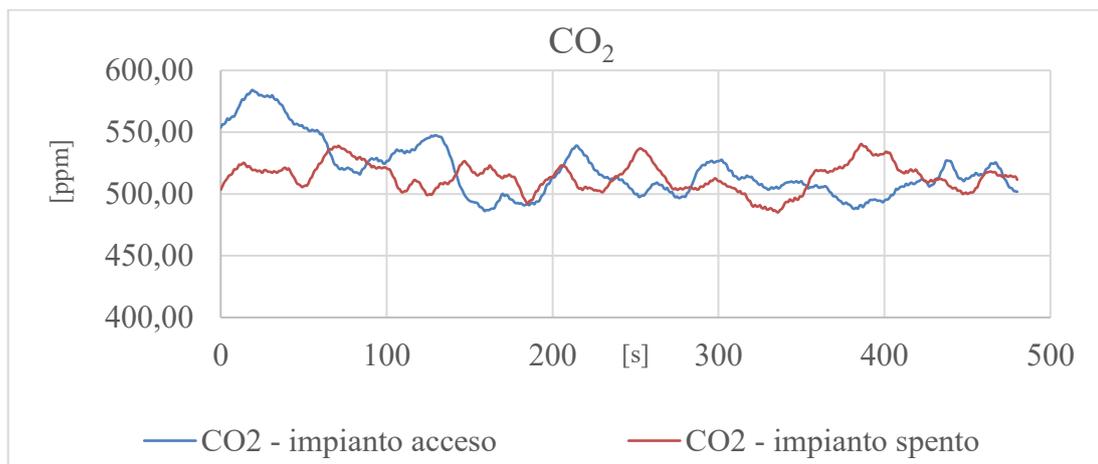


Grafico 5.47: stazione 2, concentrazione anidride carbonica

Per quanto riguarda la CO₂ i livelli nella seconda stazione non presentano significative variazioni, si mantengono pressoché costanti sia ad impianto acceso e ad impianto

spento. Ci sono lievi variazioni nei primi 100 secondi, poi si assestano dopo i 100 secondi di monitoraggio.

5.1.6.3 Stazione 3 - Anidride carbonica

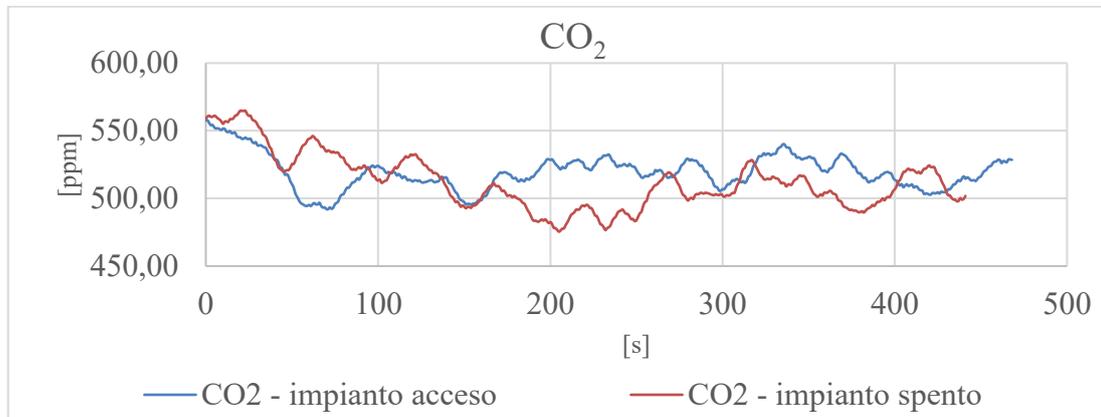


Grafico 5.48: stazione 3, concentrazione anidride carbonica

L'andamento relativo all'anidride carbonica nella terza stazione, presenta molteplici variazioni, sia nel caso dove sono attivi i recuperatori termodinamici e sia nel caso dove sono spenti. Tuttavia nello scenario ove è presente l'impianto, si nota che le variazioni sono in un range più contenuto, compreso tra circa 490,00 ppm e 550,00 ppm.

5.1.6.4 Stazione 4 - Anidride carbonica

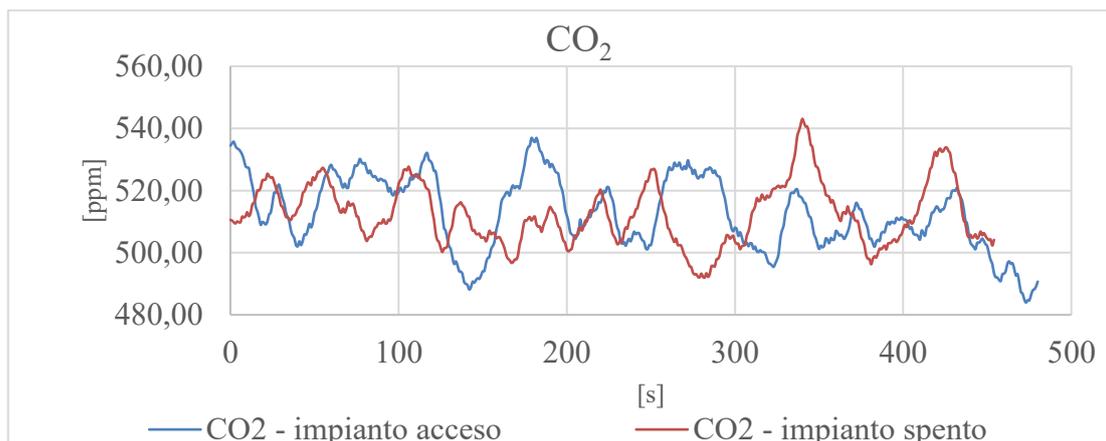


Grafico 5.49: stazione 4, concentrazione anidride carbonica

I valori di CO₂ per quanto riguarda la quarta stazione subiscono variazioni in un range compreso tra 490 ppm e 540 ppm; pertanto, sia la curva rossa e la curva blu hanno un comportamento analogo.

5.1.6.5 Stazione 5 – Anidride carbonica

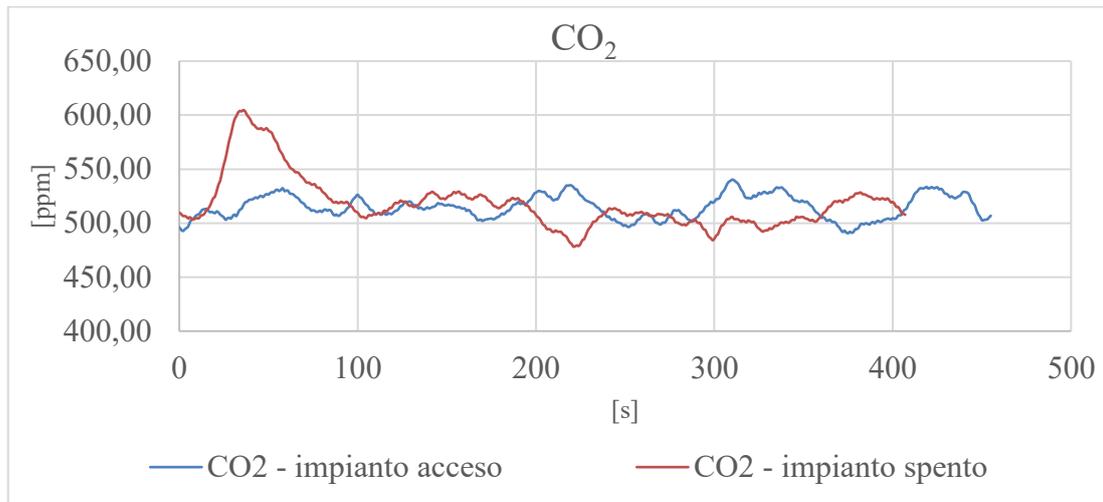


Grafico 5.49: stazione 5, concentrazione anidride carbonica

L'andamento dell'anidride carbonica nella quinta stazione non presenta molte variazioni tra uno scenario e l'altro, i valori mediamente si mantengono pressoché costanti ad un valore di 500 ppm.

5.1.6.6 Stazione 6 – Anidride carbonica

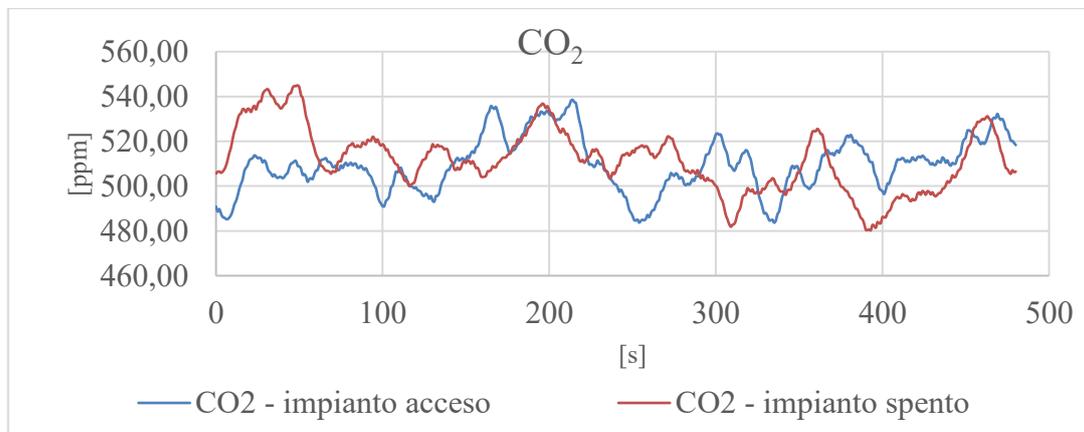


Grafico 5.50: stazione 6, concentrazione anidride carbonica

L'andamento della curva rossa che fa riferimento allo scenario in cui l'impianto è spento presenta del valore di CO₂ nei primi 50 secondi di monitoraggio (raggiunge 545 ppm). Per il restante tempo di monitoraggio l'andamento tra i due scenari è simile, le variazioni sono contenute in un range compreso tra 480 ppm e 540 ppm.

5.1.6.7 Stazione 7 – Anidride carbonica

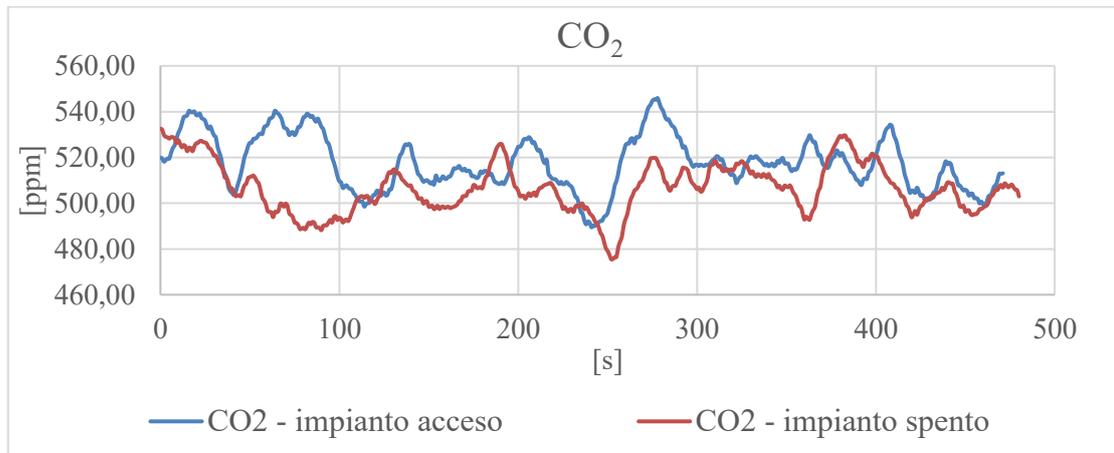


Grafico 5.51: stazione 7, concentrazione anidride carbonica

Nella settima stazione si nota un andamento congruo con la stazione precedente per quanto riguarda il range delle oscillazioni di entrambi gli scenari.

5.1.6.8 Stazione 8 – Anidride carbonica

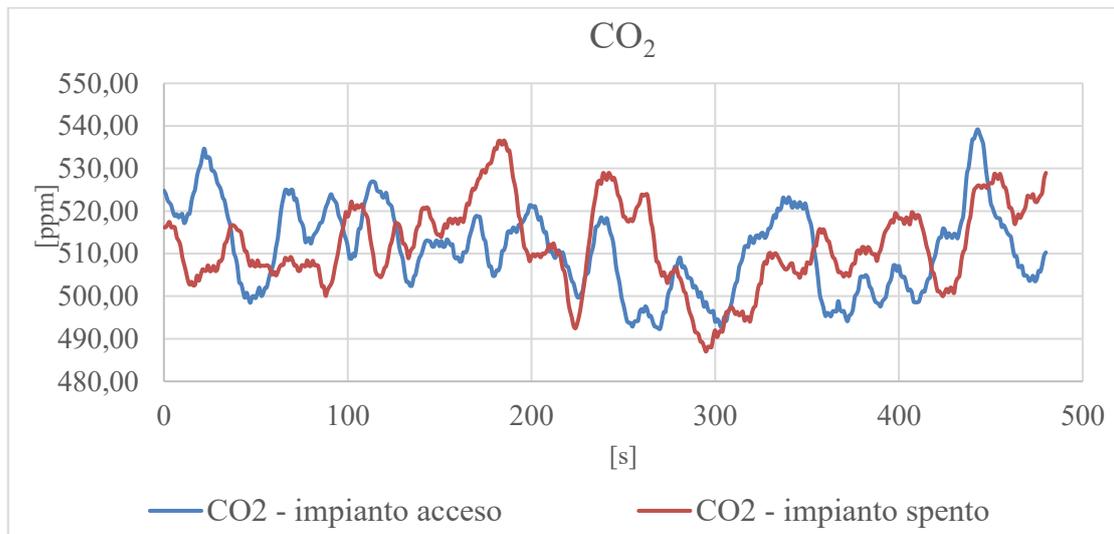


Grafico 5.52: stazione 8, concentrazione anidride carbonica

L'ottava stazione presenta un andamento dell'anidride carbonica con valori che si mantengono pressoché nello stesso range nei due scenari.

Si nota però un maggior controllo sulla CO₂ nello scenario relativo all'impianto acceso, in quanto sono presenti maggiori variazioni.

5.1.6.9 Stazione 9 – Anidride carbonica

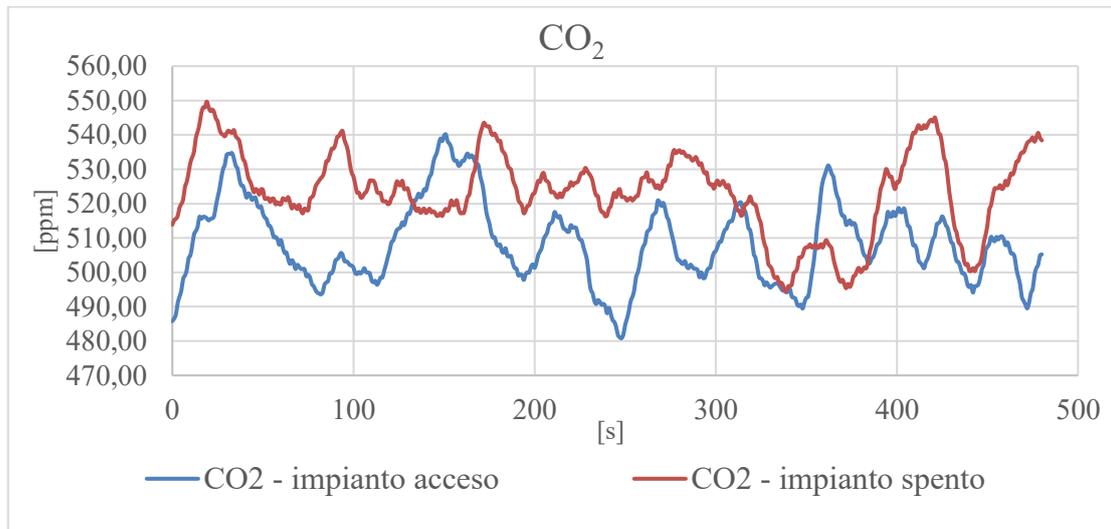


Grafico 5.53: stazione 9, concentrazione anidride carbonica

I valori di CO₂ nella nona stazione variano tra un minimo di 480 ppm, fino a 540 ppm, nello scenario relativo alla presenza dei recuperatori termodinamici. Dal grafico si nota che la curva rossa, relativa al solo impianto preesistente, possiede valori di CO₂ mediamente più alti.

5.1.7 DISTRIBUZIONE DELLE CONCENTRAZIONI DI CO₂

Per rappresentare graficamente la distribuzione delle velocità dell'aria all'interno dell'aula S3 è stato utilizzato il software "Tecplot 360 EX".

È stata realizzata una tabella Excel, i valori presenti nella prima riga e nella prima colonna fanno riferimento alle quote dove sono state effettuate le stazioni.

| | | | |
|---------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | 3 [m] | 7,1 [m] | 10,9 [m] |
| 1,5 [m] | Valore 1 ^a stazione | Valore 4 ^a stazione | Valore 7 ^a stazione |
| 5,2 [m] | Valore 2 ^a stazione | Valore 5 ^a stazione | Valore 8 ^a stazione |
| 8,4 [m] | Valore 3 ^a stazione | Valore 6 ^a stazione | Valore 9 ^a stazione |

Tabella 5.54: carpet per l'importazione dei dati nel software Tecplot 360 EX

I dati sono stati importati nel software come "carpet". La tabella quindi fornisce in input al software i valori medi di CO₂ per 10 minuti di monitoraggio. Il software quindi poi ha effettuato un'interpolazione per fornire in output l'andamento delle concentrazioni di anidride carbonica.

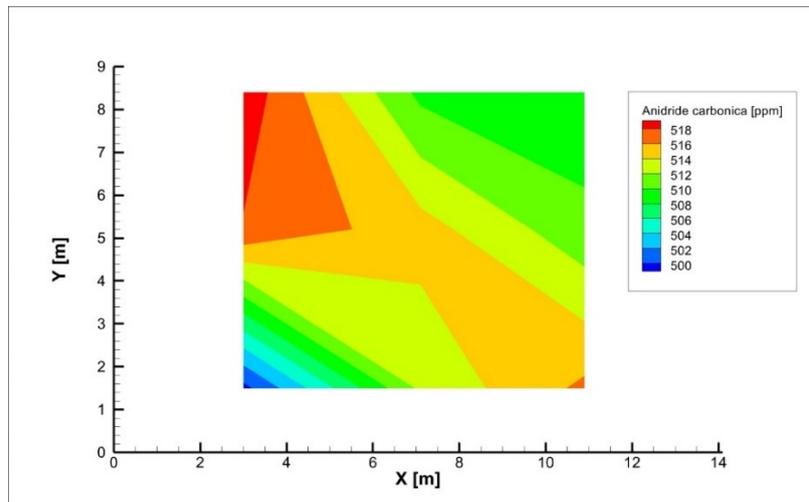
La distribuzione delle velocità fa riferimento ai due scenari presi in esame precedentemente:

- Recuperatori termodinamici accesi con portata massima di 2400 m³/h
- Recuperatori termodinamici spenti, ventilazione dovuta all'impianto preesistente (988 m³/h)

Risulta necessario rappresentare la distribuzione di anidride carbonica all'interno dell'aula, in quanto la CO₂ rappresenta un allarme per la presenza di eventuali cariche virali.

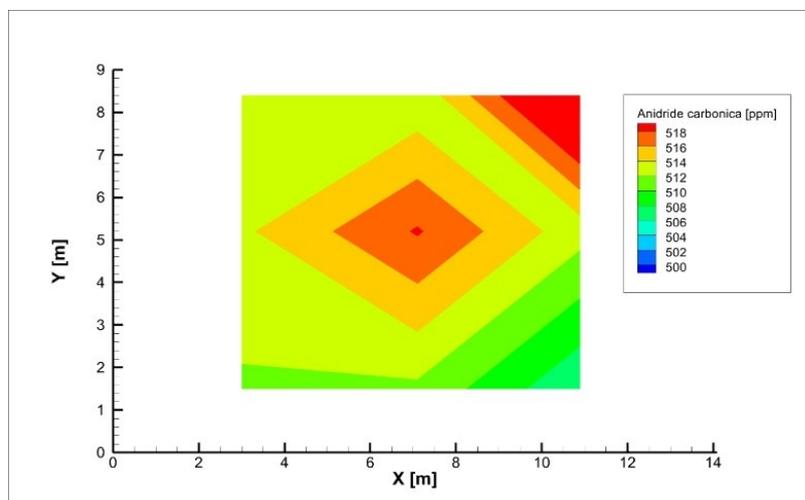
Le misurazioni sono state effettuate durante il blocco delle attività didattiche pertanto non vi è la presenza degli studenti, ma è possibile comunque scorgere le zone a più elevata criticità.

5.1.7.1 Concentrazioni di anidride carbonica (impianto acceso)

Figura 5.55: concentrazione di CO₂ (impianto acceso)

I valori medi di CO₂ restano compresi tra 500 ppm e 518 ppm. I valori maggiori si riscontrano nel lato dove vi è l'assenza delle finestre, mentre i valori minori risultano invece nella zona adiacente agli infissi.

5.1.7.2 Concentrazioni di anidride carbonica (impianto spento)

Figura 5.56: concentrazione di CO₂ (impianto acceso)

Per quanto concerne lo scenario dove è in funzione l'impianto preesistente si nota che i valori maggiori di CO₂ sono concentrate al centro dell'aula. Quindi si nota che la qualità dell'aria è migliore nella zona adiacente agli anemostati.

CAPITOLO 6

6 RISCHIO DI CONTAGIO

6.1 OBIETTIVI DEL CALCOLO

L'obiettivo che ci si pone è quello di stimare il rischio di contagio e mostrare come quest'ultimo vari in relazione alle strategie di mitigazione del rischio.

La stima del rischio di contagio da SARS-CoV-2 è stata calcolata utilizzando le equazioni proposte dallo studio di G. Buonanno et al. [8], già descritte allo Stato dell'Arte, al Capitolo 2 del presente lavoro di Tesi.

Pertanto è stato realizzato un foglio Excel al fine di mostrare come varia il rischio di contagio variando il parametro AER "Air Exchange Rate".

Nel presente Capitolo quindi si prenderanno dapprima in esame i parametri per il calcolo poi si farà una considerazione sul tempo di permanenza per mostrare la variazione del rischio di contagio in relazione ad esso.

Il confronto sarà in funzione della portata di mandata fornita dai recuperatori termodinamici in relazione al volume dell'aula S3 oggetto di studio.

Al fine di avere una rappresentazione simile ad un caso reale, dove gli studenti permangono all'interno dell'aula per un'ora di lezione e poi si ha una pausa tra una lezione e la successiva; si è considerata un'ora di permanenza di un soggetto positivo al SARS-CoV-2.

6.2 CALCOLO DELLA PROBABILITÀ DI CONTAGIO

6.2.1 FORMULA PER IL CALCOLO DELLA CONCENTRAZIONE DEI QUANTA ALL'INTERNO DELL'AMBIENTE

$$n(t, ER_q) = n_0 \cdot e^{-IVRR \cdot t} + \frac{ER_q \cdot I}{IVRR \cdot V} \cdot (1 - e^{-IVRR \cdot t}) \quad [8]$$

6.2.1.1 Parametri per il calcolo della concentrazione dei quanta all'interno dell'ambiente

I parametri necessari per il calcolo pertanto sono i seguenti:

- n_0 è la concentrazione iniziale dei quanta all'interno dell'ambiente. Nel foglio di calcolo si considera che la concentrazione iniziale dei quanta sia nulla; successivamente dopo l'uscita del soggetto infetto la concentrazione n_0 rappresenterà la concentrazione relativa ai quanta presenti all'interno dell'aula.
- Il parametro $IVRR$ (tasso di rimozione della carica virale) come già affrontato nel Capitolo 2, è la somma di tre contributi:
 - Il parametro k viene assunto pari a $0,24 \text{ h}^{-1}$, questo parametro considera la deposizione dei quanta sulle superfici ed è stato stimato considerando un'altezza di emissione di 1,50 m. [20]
 - λ il tasso di inattivazione del virus, è pari a $0,63 \text{ h}^{-1}$.
 - Il parametro $AER \text{ h}^{-1}$ viene riferito alla ventilazione all'interno dell'ambiente. Pertanto per poter effettuare un confronto su come vari il rischio di contagio si agirà sull'Air Exchange Rate "AER".

Calcolando l'Air Exchange Rate in funzione delle portate che possono essere fornite dai due recuperatori presenti e dal volume della stanza, si ottengono i seguenti valori:

| PORTATA [m ³ /h] | AER [h ⁻¹] |
|-----------------------------|------------------------|
| 1900 | 3,98 |
| 2000 | 4,20 |
| 2100 | 4,40 |
| 2200 | 4,62 |
| 2300 | 4,82 |
| 2400 | 5,03 |

Tabella 6.1: valori di "Air Exchange Rate" in relazione alle portate dell'impianto

- Il volume V dell'ambiente, nello specifico caso di studio dell'aula S3 è di 476,50 m³.

Il calcolo della concentrazione di quanta $n(t, ER_q)$, è in funzione del tempo di permanenza t del soggetto positivo al SARS-CoV-2 e del parametro ER_q [8] "Emission Rate of quanta"; il quale identifica i quanta emessi in un'ora [quanta/h].

- Il tempo di permanenza t del soggetto infetto, stimato in un'ora di permanenza; considerando che vi sia una pausa tra una lezione e la successiva.
- Il parametro ER_q è stato assunto pari a 67 quanta/h.

L'andamento della concentrazione dei quanta pertanto aumenterà in modo esponenziale durante il periodo di permanenza del soggetto positivo; dopodiché accadrà che, in seguito all'uscita del soggetto positivo al SARS-CoV-2 le concentrazioni di quanta all'interno dell'ambiente non saranno nulle ma decadranno con andamento esponenziale in relazione al parametro $IVRR$.

Il rischio di contagio relativo alle persone presenti anche dopo l'uscita del soggetto infetto sarà cumulativo. L'emissione dei quanta infettanti varia notevolmente anche in base all'attività svolta dal soggetto, un aumento dell'attività svolta produce un aumento della portata di ventilazione polmonare. Di conseguenza, aumentando la

portata di ventilazione polmonare aumenteranno anche i quanta prodotti dal soggetto infetto.

I dispositivi di protezione individuali riescono a fornire una diminuzione della produzione dei quanta, generalmente si può affermare che la riduzione del rischio di trasmissione del virus vari in relazione alla tipologia di mascherina.



Figura 6.2: tipologie di mascherine e immagine che mostra la diminuzione dei droplets.

Lo studio di Chen et al. [32] infatti asserisce che le mascherine facciali N95 riducono il rischio di trasmettere il virus del 97%, le mascherine chirurgiche del 84%; mentre le mascherine in tessuto (realizzate a casa) possono ridurre il rischio di trasmissione del 67%.

6.2.2 CALCOLO DELLA DOSE INFETTANTE

Dopo aver determinato $n(t, ER_q)$ con la formula:

$$n(t, ER_q) = n_0 \cdot e^{-IVRR \cdot t} + \frac{ER_q \cdot I}{IVRR \cdot V} \cdot (1 - e^{-IVRR \cdot t}) \quad [8]$$

Integrando $n(t, ER_q)$ è stato quindi calcolato $D_q(ER_q)$.

Pertanto la dose infettante inalata dal soggetto è stata calcolata mediante la formula, integrando la concentrazione dei quanta infettanti sul tempo.

$$D_q(ER_q) = IR \int_0^T n(t) dt \quad [quanta]$$

Il parametro IR “Inhalation Rate, fuori dall’integrale in quanto non dipendente dal tempo, fa riferimento alla portata di inspirazione. Tale parametro è stato posto uguale a $0,54 \text{ m}^3/\text{h}$; considerando l’attività sedentaria degli occupanti durante le ore di lezione.

6.2.3 CALCOLO DELLA PROBABILITÀ DI CONTAGIO

La formula per il calcolo della probabilità di contagio “Probability of infection” è la seguente:

$$P_I = 1 - e^{-Dq} \quad [\%] \quad [8]$$

È interessante notare come la probabilità di contagio sia cumulativa per gli occupanti all’interno dell’ambiente, nel senso che, dopo l’uscita del soggetto infetto la concentrazione dei quanta infettanti all’interno dell’aula non sarà nulla. Vi sarà una concentrazione residua che decadrà grazie al tasso di rimozione delle cariche virali, ma che comunque rappresenterà un rischio per gli occupanti già presenti.

Per una persona che dovesse entrare dopo l’uscita del soggetto infetto non avrà una probabilità di contagio elevata come le persone già presenti prima dell’uscita del soggetto infetto.

6.2.4 CONSIDERAZIONI SUL TEMPO DI PERMANENZA E CONSEGUENZE SUL RISCHIO DI CONTAGIO

Per quanto riguarda il tempo di permanenza, si può notare dal seguente grafico come quest'ultimo influenzi molto il rischio finale di contagio. Per mostrare le conseguenze di un tempo di permanenza elevato sono stati presi in esame due scenari, con differenti tempi di permanenza.

Nel primo scenario il tempo di occupazione del soggetto infetto è di un'ora. Il secondo scenario, non molto verosimile in un caso reale (in quanto per il rischio Covid i tempi di permanenza vanno ridotti) prevede la presenza del soggetto infetto per 4 ore consecutive.

Entrambi gli scenari fanno riferimento alla portata massima che può essere fornita dai due recuperatori termodinamici, 2400 m³/h; pertanto l'AER sarà di circa 5,0 h⁻¹.

Si considera che la totalità dell'aria provenga solo dai recuperatori termodinamici, non si considera pertanto la portata di rinnovo fornita dall'impianto preesistente di 988 m³/h, inoltre non si considera la ventilazione naturale (0,5 vol/h).

Il rischio finale sarà relativo al caso più favorevole in quanto il parametro AER, essendo un termine contenuto all'interno del "Tasso di Rimozione di cariche virali" $IVRR [h^{-1}]$ contribuisce alla rimozione delle cariche virali all'interno dell'ambiente e quindi alla mitigazione del rischio di contagio.

6.2.4.1 Scenario 1, tempo di permanenza del soggetto infetto: un'ora

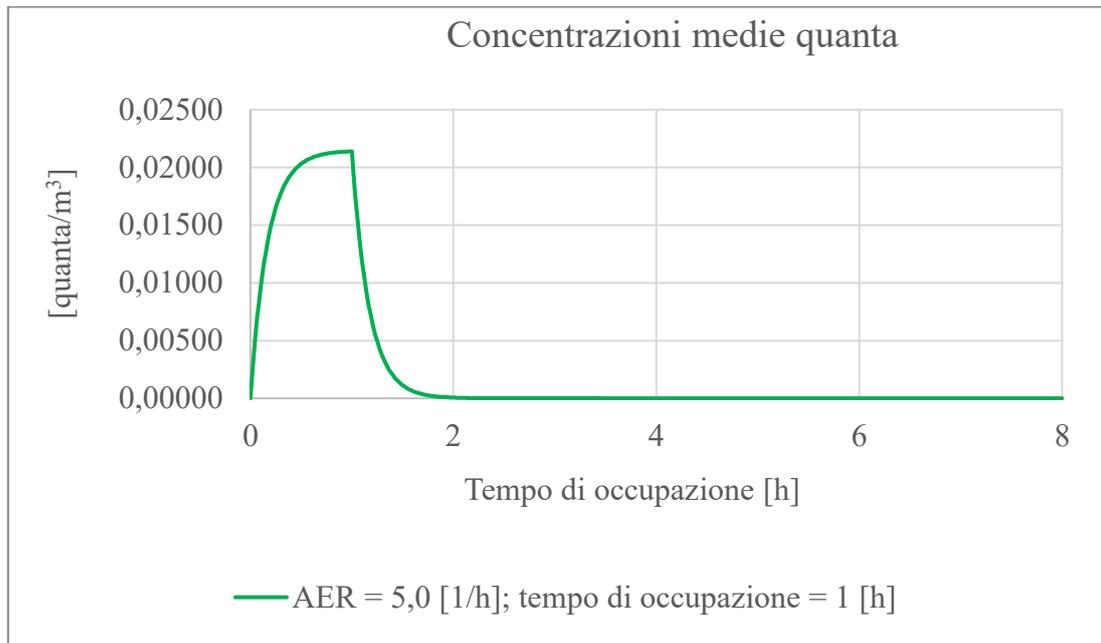


Grafico 6.3: andamento delle concentrazioni medie dei quanta con AER=5,0 [1/h]; t=1h

Nel primo scenario si nota come le concentrazioni di quanta all'interno dell'aula S3 aumentino in modo esponenziale qualora fosse presente un soggetto infetto all'inizio dell'ora di lezione. Successivamente, considerando che il soggetto esca dopo un'ora in seguito ad una pausa, si nota il decadimento esponenziale dei quanta all'interno dell'ambiente.

6.2.4.2 Scenario 2, tempo di permanenza del soggetto infetto: 4 ore

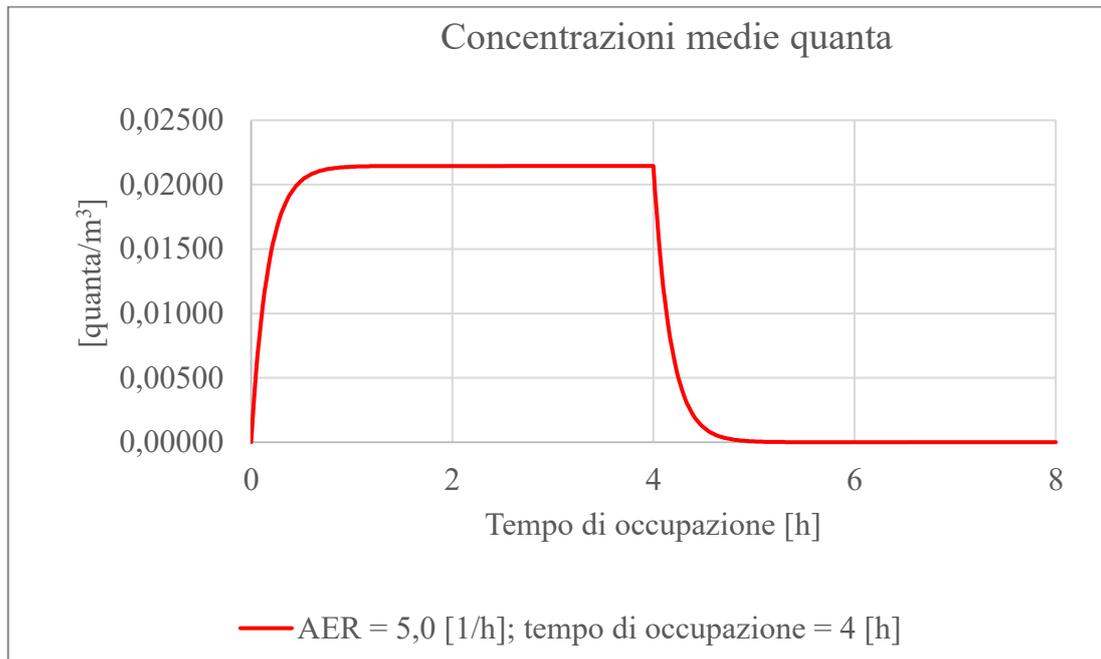


Grafico 6.4: andamento delle concentrazioni medie dei quanta con AER=5,0 [1/h]; t=4h

Nel secondo scenario si nota allo stesso modo l'aumento della concentrazione dei quanta, maggiori in questo caso, in quanto vi è l'aumento del tempo di permanenza del soggetto positivo al SARS-CoV-2.

Allo stesso modo, dopo l'uscita del soggetto infetto, vi è il decadimento esponenziale della concentrazione dei quanta grazie alla portata massima fornita dai recuperatori termodinamici.

Il seguente grafico riporta invece il confronto della probabilità di contagio dei due scenari presi in esame.

La probabilità di essere infettati nel primo scenario è di circa il 2 % (curva verde). Per quanto riguarda lo scenario con tempo di permanenza maggiorato (curva rossa) si nota un aumento della percentuale fino a 4 ore, raggiungendo una probabilità del 9 %. Successivamente il rischio si mantiene ad un valore pressoché costante, con diminuzione che non è possibile vedere dal grafico.

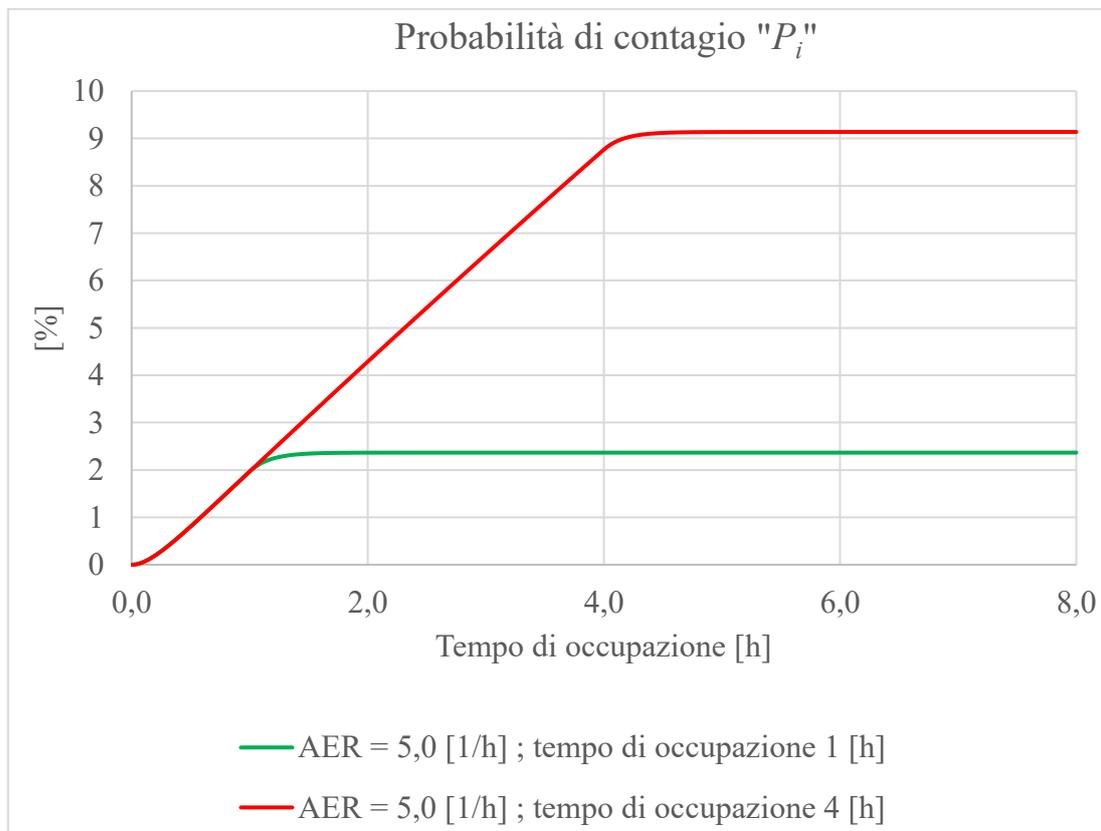


Grafico 6.5: confronto delle probabilità di contagio tra $t=1h$ e $t=4h$; $AER=5,0$ [1/h]

Pertanto il tempo di occupazione influenza notevolmente il rischio di contagio indiretto dovuto all'inalazione di aerosol infetto. Sebbene gli scenari facciano riferimento al caso più favorevole ($AER = 2,50 \text{ h}^{-1}$) mostrano comunque le differenze tra le probabilità di contagio.

Il parametro AER è il parametro sul quale si deve agire con il fine di diminuire la concentrazione dei quanta infettanti all'interno dell'ambiente.

6.2.5 PROBABILITÀ DI CONTAGIO AD IMPIANTO SPENTO

La probabilità di contagio ad impianto spento è stata ottenuta considerando la portata ad impianto spento di $988 \text{ m}^3/\text{h}$, quindi la portata è stata divisa per il volume pari a $476,50 \text{ m}^3$, ottenendo un Air Exchange Rate (tasso di ricambio orario) di: $2,07 \text{ h}^{-1}$.

Per mostrare le differenze sono stati considerati due scenari: il primo scenario prevede un tempo di permanenza del soggetto positivo pari ad un'ora, il secondo scenario invece prevede la presenza di un soggetto positivo per due ore.

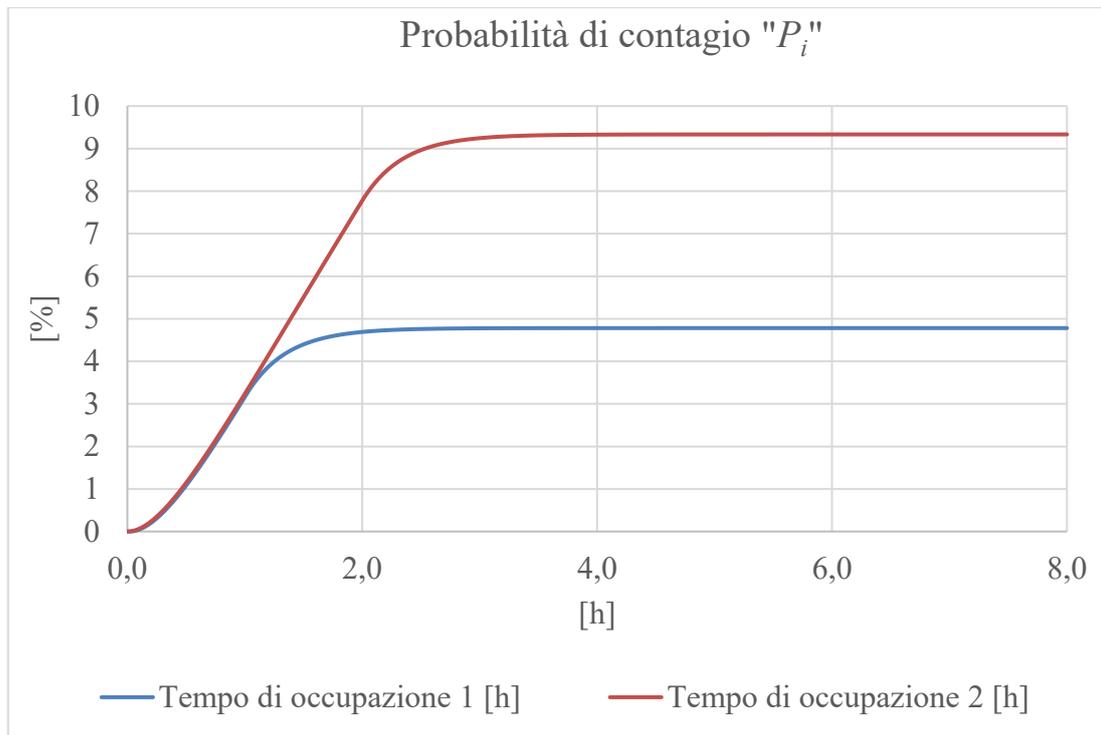


Grafico 6.6: confronto delle probabilità di contagio tra $t=1\text{h}$ e $t=2\text{h}$; $AER=2,07 [1/\text{h}]$

Da come si può notare nel grafico, se il soggetto positivo restasse all'interno dell'aula per circa un'ora si avrebbe un rischio di contagio pari quasi al 5% (curva blu), dopo due ore di permanenza il rischio di contagio aumenta e supera il 9% (curva rossa).

6.2.6 CONSIDERAZIONI SULLA RIPRESA DELL'ATTIVITÀ DIDATTICA

Prendendo in esame le principali normative che si pongono l'obiettivo di quantificare la portata d'aria necessaria negli ambienti è necessario quantificare la capienza dell'aula per poter riprendere a settembre l'attività in sicurezza. La capienza dell'aula è di 136 persone, la cui capienza è stata ridotta a 47 persone per l'emergenza CoViD

- Il **Decreto Ministeriale 1975** [33] impone per un'aula universitaria un ricambio orario di 5 vol/h, quindi, moltiplicando per il volume dell'aula S3 che è di 476,50 m³ si ottiene una portata di 2382,50 m³/h. Pertanto considerando che nell'aula S3 siano in funzione I due recuperatori termodinamici con una portata complessiva massima di 2400 m³/h si nota che si rientra nei limiti del DM75.
- La normativa **DIN 1946-6** [34] impone 30 m³/h a persona, dunque sapendo che la portata massima fornita dai due recuperatori è di 2400 m³/h la capienza massima derivante dal calcolo è di **80 persone**.
- Infine la norma **UNI 10339-1995** [35] fornisce indicazioni sulla portata esterna (o di estrazione) e sull'indice di affollamento; nello specifico:

➤ **Considerando la portata esterna Q_{op} si ha:**

$Q_{op} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ per persona e quindi **25,2 m³/h a persona**.

Sapendo che la portata complessiva fornita dai due recuperatori è di 2400 m³/h, dividendo per 25,2 m³/h a persona; si ottiene una capienza di **95 persone**.

➤ **Considerando l'indice di affollamento n si ha:**

$n = 0,6 \text{ persone}/\text{m}^2$

Moltiplicando l'indice di affollamento per la superficie dell'aula S3 che è di 166 m², si ottiene che la capienza massima dell'aula è di **100 persone**.

Per una semplicità di visualizzazione vi è di seguito una tabella con le normative

| Normative | Portate [m ³ /h] | Persone | AER [m ³ /h] |
|-----------------------------------|-----------------------------|---------|-------------------------|
| DIN 1946-6 | 2400 | 80 | 5,04 |
| UNI 10339 (calcolo con Q_{op}) | 2400 | 95 | 5,04 |
| UNI 10339 (calcolo con n) | 2520 | 100 | 5,29 |

Tabella 6.7: confronto delle probabilità di contagio tra $t=1h$ e $t=4h$; $AER=5,0$ [1/h]

Come rischio considerando un $AER = 5,00 \text{ h}^{-1}$ (considerando l'assenza delle mascherine e la presenza del soggetto infetto di 60 minuti) si ha un rischio pari al 2,37% (l'AER è rapportato ad una capienza di 80 persone).

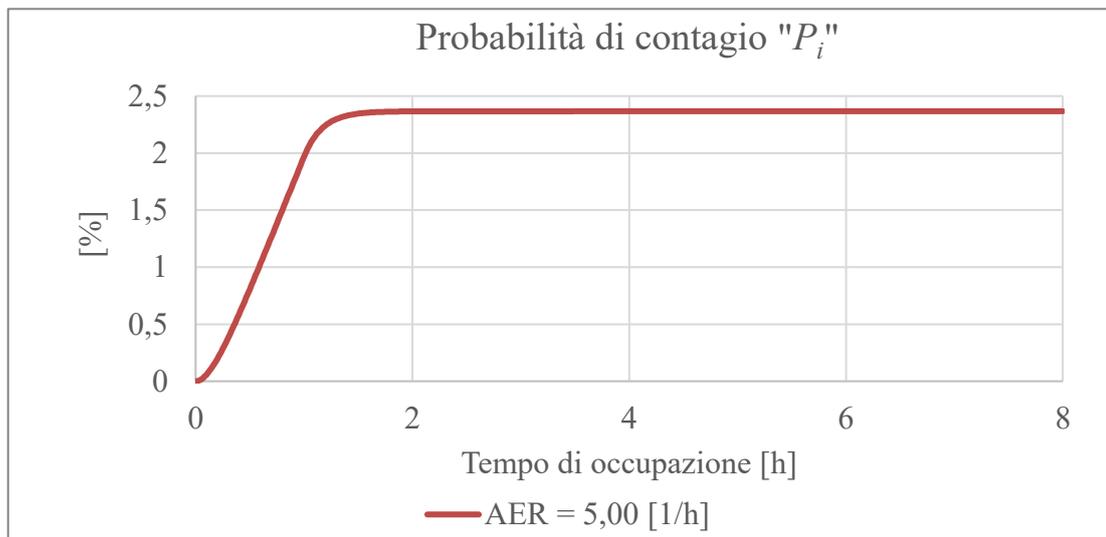


Grafico 6.8: probabilità di contagio per una capienza di 80 persone

Considerando la DIN 1946-6 (più cautelativa) se la capienza fosse di 80 persone il tasso di ricambio orario (AER) dovrebbe essere di 5 h^{-1} , al contrario con **100 persone** dovrebbe essere di **$6,29 \text{ h}^{-1}$** ; invece con una capienza massima uguale a quella prima dell'emergenza CoViD con **136 persone** il tasso di ricambio orario (AER) dovrebbe essere di circa **$8,56 \text{ h}^{-1}$** .

6.2.6.1 Considerazioni su diversi scenari di permanenza

Bisogna tenere in considerazione che l'impianto preesistente fornisce 988 m³/h e invece i due recuperatori termodinamici potrebbero fornire complessivamente al massimo 2400 m³/h.

La stima della probabilità di contagio prevede l'introduzione del parametro AER, ma non degli occupanti sani; bisogna tenere in considerazione quindi (considerando la portata d'aria immessa dai due recuperatori di 2400 m³/h) che il tasso di ricambio orario fornito sarà sempre pari a 5,00 h⁻¹ nel caso di un'occupazione di 80 persone, 100 persone e 136 persone.

Pertanto, considerando che l'AER = 5,00 h⁻¹ sia pari al 100% che può essere fornito (capienza = 80 persone) la normativa DIN 1946-6 risulta rispettata; con una probabilità di contagio di circa il 2,37%.

Al contrario, volendo introdurre rispettivamente 100 persone e 136 persone, **l'impianto dovrebbe fornire rispettivamente il 25,8% e il 71,24% in più rispetto all'AER massimo fornito.**

Ciò ha conseguenze ovviamente sulla probabilità di contagio, pertanto è come se l'impianto teoricamente stesse fornendo meno ricambi orari.

| Capienza [persone] | AER fornito [h ⁻¹] | AER [h ⁻¹] da fornire per rispettare la DIN 1946-6 | Probabilità di contagio [%] |
|--------------------|--------------------------------|--|-----------------------------|
| 80 | 5,00 | 5,00 | 2,37 |
| 100 | 5,00 | 6,29 | 2,98 |
| 136 | 5,00 | 8,56 | 4,07 |

Tabella 6.9: correlazione AER e probabilità di contagio

Considerando la capienza originaria dell'aula di 136 persone e in via cautelativa la maggiore portata a persona fornita dalla normativa DIN 1946-6 si nota come la portata di rinnovo debba essere di 4080 m³/h, mentre quella fornita al massimo, considerando anche nel migliore dei casi l'impianto preesistente sarebbe di 3388 m³/h

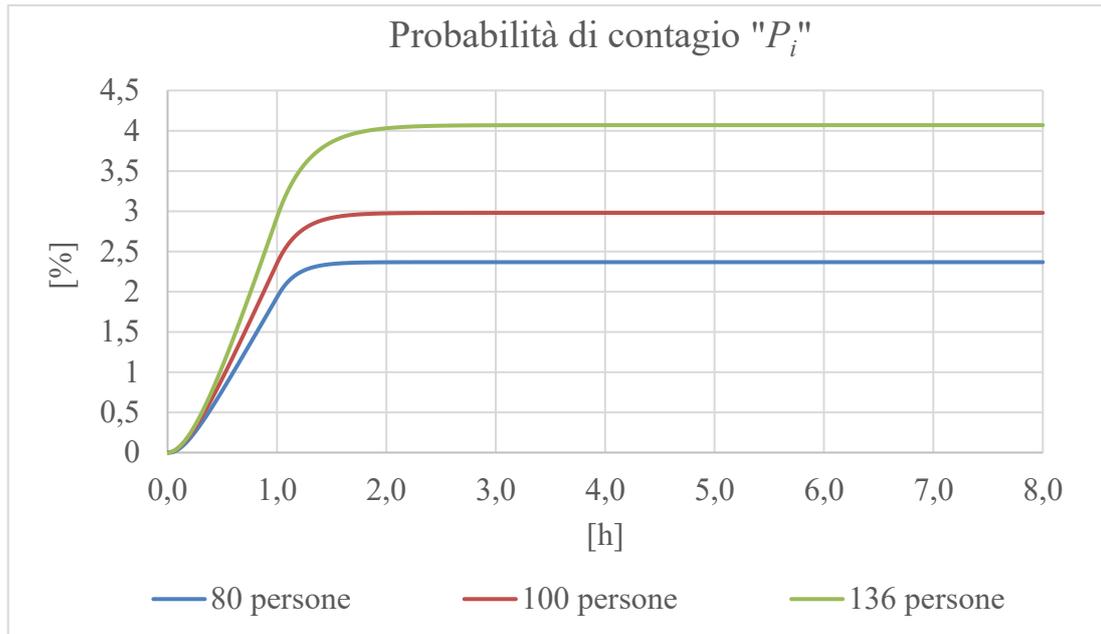


Grafico 6.10: probabilità di contagio per i diversi scenari di occupazione

Dal *Grafico 6.10* è possibile notare come nello scenario con 80 persone il rischio sia del 2,37 %, nello scenario con 100 persone il rischio raggiunge un valore del 3% e nello scenario di capienza pre-pandemia il rischio si attesta a circa il 4%.

6.2.6.2 Considerazioni sull'utilizzo della mascherina

Considerando l'avanzamento della campagna vaccinale durante questo periodo, vi è un'incognita per quanto riguarda il possibile utilizzo delle mascherine per la didattica in presenza a settembre, specie per la presenza di varianti.

Le mascherine negli ambienti indoor rappresentano una certezza per la riduzione dell'emissione dei quanta.

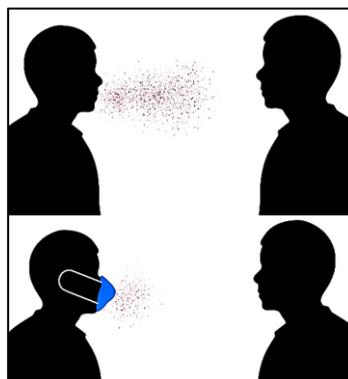


Figura 6.11: differenze nell'emissione dei quanta con l'utilizzo dei DPI

Lo studio di Chen et al. [32], citato precedentemente, fa riferimento alla riduzione della trasmissione del virus SARS-CoV-2 con i dispositivi di protezione facciale. Le mascherine facciali N95 riducono il rischio di trasmettere il virus del 97%, le mascherine chirurgiche del 84%; mentre le mascherine in tessuto (realizzate a casa) possono ridurre il rischio di trasmissione del 67%. Quindi possiamo affermare che le mascherine riescono a diminuire la trasmissione del virus al di sopra del 50%.

Volendo calcolare il rischio negli scenari presentati precedentemente si considera una riduzione del parametro ER_q del 50%, facendo riferimento alla situazione meno favorevole. Quindi il calcolo è stato effettuato con 33,5 quanta/h anziché 67 quanta/h.

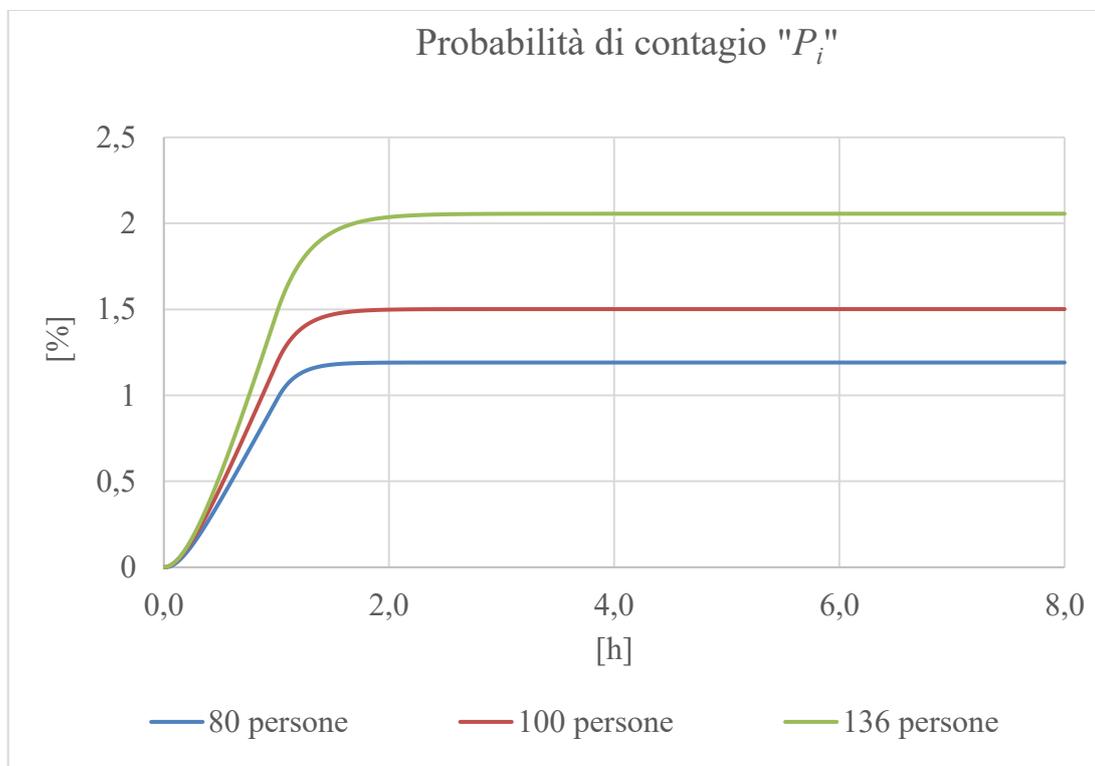


Grafico 6.12: probabilità di contagio per i diversi scenari di occupazione con mascherina

La probabilità di contagio è stata calcolata considerando la presenza di un soggetto infetto per un'ora, con una capienza di 80 persone e con l'utilizzo della mascherina il rischio supera di poco l'1%, con 100 persone si ha un rischio del 1,5%; al contrario con 136 si ha un rischio di circa il 2%.

CAPITOLO 7

7 CONCLUSIONI

Il presente lavoro di Tesi vuole presentare un consiglio per la ripresa delle attività didattiche in presenza.

Per quanto riguarda l'impianto aggiunto in seguito all'emergenza Covid, durante l'estate 2020, bisogna considerare che con un tasso di ricambio orario di 5,00 vol/h vengono rispettate le seguenti normative: il DM75, la norma UNI 10339 e anche la più cautelativa DIN 1946-6.

La probabilità di contagio risulta essere del 2,37 % con 80 persone. Considerando la variabilità del parametro ER_q per quanto riguarda l'emissione dei quanta infetti conviene metterci nello scenario più cautelativo rispetto alle capienze di 100 e 136 persone.

Gli impianti di vecchia realizzazione dovranno certamente essere adeguati alla norma UNI 10339 ma considerando il problema connesso a SARS-CoV-2 sarebbe auspicabile un adeguamento alla norma DIN 1946-6, la quale impone 30 m³/h a persona.

Come principio base, è necessario ricordare che le eventuali cariche virali presenti all'interno di uno specifico ambiente dovranno essere asportate il più rapidamente possibile o (al limite) diluite il più possibile, per ridurre la probabilità di infezione da bio-aerosol. L'aerosol rappresenta un rischio per gli occupanti in quanto rappresenta un evento di diffusività estrema con il rischio di rendere vano il distanziamento personale.

Per quanto riguarda la tipologia di impianto è meglio propagare uniformemente l'aria di rinnovo in ambiente, sia per evitare il discomfort degli occupanti e sia per evitare velocità dell'aria elevate e fenomeni di trascinamento delle particelle delle cariche virali dovute a turbolenze.

È conveniente optare per sistemi che immettano l'aria in maniera distribuita piuttosto che in maniera puntuale. Impianti con ventilconvettori potrebbero rappresentare un problema dal punto di vista del trascinamento di particelle infettanti all'interno di un ambiente.

L'esperienza accaduta nel ristorante di Guangzhou ci mostra infatti come la ventilazione sia di fondamentale importanza per arginare il rischio di contagio, all'interno del ristorante, come già spiegato nel Capitolo dello Stato dell'Arte vi era già distanziamento tra i tavoli ma la ventilazione era insufficiente.

In fase di progettazione occorre posizionare correttamente le griglie di presa di aria esterna e di espulsione, esse infatti vanno posizionate in modo tale che non vi siano cortocircuiti tra i flussi di aria scevra di agenti patogeni proveniente dall'esterno ed aria esausta; il rischio sarebbe quello di contaminare l'aria di rinnovo o di vanificare il rinnovo stesso (perché nel caso ci fossero cortocircuiti l'aria immessa verrebbe espulsa non garantendo il corretto rinnovo d'aria nell'ambiente).

Inoltre è necessario porre attenzione agli ambienti in depressione, ossia dove il volume di estrazione è maggiore del volume di immissione. Nei servizi igienici bisogna evitare che le griglie di ripresa siano in serie, in quanto vi è anche una concreta possibilità di contagio oro-fecale.

Come principio base bisogna considerare l'aria di un ambiente sempre contaminata e in quanto tale, i canali dove essa transiterà, non dovranno comunicare tra ambienti contigui e inoltre il ricircolo d'aria non va assolutamente utilizzato.

I dispositivi di protezione, quali mascherine, sono utili e fondamentali negli ambienti chiusi al fine di diminuire l'emissione dei quanta infettanti ma da soli non bastano; il rischio di contagio da aerosol è tangibile se non si riescono ad aumentare i ricambi d'ora.

Per quanto riguarda il caso di studio si fa presente che i due recuperatori termodinamici con canali microforati rappresentano una diminuzione del rischio in quanto essendo i flussi fisicamente separati, non vi è il rischio di contaminazioni d'aria; come al

contrario potrebbe accadere con un recuperatore statico qualora si dovessero danneggiare le lamelle dello scambiatore.

I due recuperatori di calore, attraverso i due canali di mandata microforati forniscono una destratificazione verticale dell'aria all'interno dell'ambiente, garantendo di base una diluizione di eventuali aerosol infetti.

Uno sguardo inoltre deve essere volto ad una progettazione dell'impianto in grado di mantenere durante il periodo estivo ed invernale livelli di comfort, garantendo anche l'obiettivo di ridurre il rischio Covid. Per la riduzione del rischio è necessario tenere sotto controllo i parametri che sono correlati direttamente ed indirettamente con il rischio Covid, quali: umidità relativa e concentrazione di CO₂ in ambiente.

In un impianto è necessario un controllo dell'umidità relativa e pertanto devono essere installati dei sensori di umidità relativa e di CO₂ al fine di monitorare le condizioni in tempo reale. Una concentrazione di 800 ppm di anidride carbonica deve far presagire la necessità di maggior rinnovo d'aria; in quanto valori di CO₂ accettabili sono di 400-500 ppm.

Con un basso livello di umidità (20-30%) si può incorrere nel rischio che si possa creare una quantità maggiore di aerosol con conseguente aumento del rischio di contagio, in quanto, diminuendo l'umidità relativa dell'ambiente aumenterebbe l'evaporazione delle goccioline espirate con la conseguenza di aumentare la produzione di aerosol infetto.

Quindi è necessario tener presente che bassi livelli di umidità e basse temperature potrebbero rappresentare un rischio per l'aerosol infetto.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] B. Bake, P. Larsson, G. Ljungkvist, E. Ljungström, and A. C. Olin, “Exhaled particles and small airways,” *Respiratory Research*, vol. 20, no. 1. BioMed Central Ltd., p. 8, Jan. 11, 2019, doi: 10.1186/s12931-019-0970-9.
- [2] W. Yang and L. C. Marr, “Dynamics of Airborne influenza A viruses indoors and dependence on humidity,” *PLoS One*, vol. 6, no. 6, p. 21481, 2011, doi: 10.1371/journal.pone.0021481.
- [3] A. C. Fears *et al.*, “Comparative dynamic aerosol efficiencies of three emergent coronaviruses and the unusual persistence of SARS-CoV-2 in aerosol suspensions,” *medRxiv Prepr. Serv. Heal. Sci.*, 2020, doi: 10.1101/2020.04.13.20063784.
- [4] S. Yuan, S. C. Jiang, and Z. L. Li, “Do Humidity and Temperature Impact the Spread of the Novel Coronavirus?,” *Front. Public Heal.*, vol. 8, p. 240, May 2020, doi: 10.3389/fpubh.2020.00240.
- [5] L. Gammaitoni and M. C. Nucci, “Using a Mathematical Model to Evaluate the Efficacy of TB Control Measures,” *Emerg. Infect. Dis.*, vol. 3, no. 3, pp. 335–342, 1997, doi: 10.3201/eid0303.970310.
- [6] R. L. Riley, “Airborne infection,” *Am. J. Med.*, vol. 57, no. 3, pp. 466–475, Sep. 1974, doi: 10.1016/0002-9343(74)90140-5.
- [7] W. F. Wells, “Airborne Contagion and Air Hygiene. An Ecological Study of Droplet Infections.,” *Airborne Contag. Air Hyg. An Ecol. Study Droplet Infect.*, 1955.
- [8] G. Buonanno, L. Morawska, and L. Stabile, “Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications,” *Environ. Int.*, vol. 145, p. 106112, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106112.

- [9] J. Lu *et al.*, “COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020,” *Emerg. Infect. Dis.*, vol. 26, no. 7, pp. 1628–1631, Jul. 2020, doi: 10.3201/eid2607.200764.
- [10] R. K. Bhagat, M. S. Davies Wykes, S. B. Dalziel, and P. F. Linden, “Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19,” *J. Fluid Mech.*, vol. 903, 2020, doi: 10.1017/jfm.2020.720.
- [11] S. L. Miller *et al.*, “Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event,” *medRxiv*, p. 2020.06.15.20132027, Jun. 2020, doi: 10.1101/2020.06.15.20132027.
- [12] L. Hamner *et al.*, “High SARS-CoV-2 Attack Rate Following Exposure at a Choir Practice — Skagit County, Washington, March 2020,” *MMWR. Morb. Mortal. Wkly. Rep.*, vol. 69, no. 19, pp. 606–610, May 2020, doi: 10.15585/mmwr.mm6919e6.
- [13] W. Schade, V. Reimer, M. Seipenbusch, and U. Willer, “Experimental investigation of aerosol and co2 dispersion for evaluation of covid-19 infection risk in a concert hall,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 6, pp. 1–11, Mar. 2021, doi: 10.3390/ijerph18063037.
- [14] L. Morawska and J. Cao, “Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality,” *Environment International*, vol. 139. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105730.
- [15] D. Murbe, M. Kriegel, J. Lange, L. Schumann, A. Hartmann, and M. Fleischer, “Aerosol emission of adolescents voices during speaking, singing and shouting,” *PLoS One*, vol. 16, no. 2 February, p. e0246819, Feb. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0246819.

- [16] Z. Pang, P. Hu, X. lu, Q. Wang, and Z. O'Neill, "A Smart CO₂-Based Ventilation Control Framework to Minimize the Infection Risk of COVID-19 In Public Buildings," 2021. https://www.researchgate.net/publication/349121056_A_Smart_CO2-Based_Ventilation_Control_Framework_to_Minimize_the_Infection_Risk_of_COVID-19_In_Public_Buildings (accessed Jun. 01, 2021).
- [17] E. Lavezzo *et al.*, "Suppression of a SARS-CoV-2 outbreak in the Italian municipality of Vo'," *Nature*, vol. 584, no. 7821, pp. 425–429, Aug. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2488-1.
- [18] T. Watanabe, T. A. Bartrand, M. H. Weir, T. Omura, and C. N. Haas, "Development of a dose-response model for SARS coronavirus," *Risk Anal.*, vol. 30, no. 7, pp. 1129–1138, Jul. 2010, doi: 10.1111/j.1539-6924.2010.01427.x.
- [19] L. D. Knibbs, L. Morawska, and S. C. Bell, "The risk of airborne influenza transmission in passenger cars," *Epidemiol. Infect.*, vol. 140, no. 3, pp. 474–478, Mar. 2012, doi: 10.1017/S0950268811000835.
- [20] S. E. Chatoutsidou and M. Lazaridis, "Assessment of the impact of particulate dry deposition on soiling of indoor cultural heritage objects found in churches and museums/libraries," *J. Cult. Herit.*, vol. 39, pp. 221–228, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.culher.2019.02.017.
- [21] G. Buonanno, L. Stabile, and L. Morawska, "Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment," *Environ. Int.*, vol. 141, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105794.
- [22] *ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, vol. 3. 2005, pp. 605–615.
- [23] S. Joshi, "The sick building syndrome," *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 12, no. 2. Wolters Kluwer -- Medknow Publications, pp. 61–64, May 01, 2008, doi: 10.4103/0019-5278.43262.

- [24] D. G. Shendell, R. Prill, W. J. Fisk, M. G. Apte, D. Blake, and D. Faulkner, “Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho,” *Indoor Air*, vol. 14, no. 5, pp. 333–341, Oct. 2004, doi: 10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x.
- [25] Istituto Superiore di Sanità, “Rapporto ISS COVID-19 n.33/2020: Indicazioni sugli impianti di ventilazione/climatizzazione in strutture comunitarie non sanitarie e in ambienti domestici in relazione alla diffusione del virus SARS-CoV-2,” *Ist. Super. della sanità*, p. 41, 2020, [Online]. Available: <https://www.iss.it/>.
- [26] Y. Chen *et al.*, “The presence of SARS-CoV-2 RNA in the feces of COVID-19 patients,” *J. Med. Virol.*, vol. 92, no. 7, pp. 833–840, Jul. 2020, doi: 10.1002/jmv.25825.
- [27] A. C. Lowen, S. Mubareka, J. Steel, and P. Palese, “Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature,” *PLoS Pathog.*, vol. 3, no. 10, pp. 1470–1476, Oct. 2007, doi: 10.1371/journal.ppat.0030151.
- [28] A. C. Lowen, J. Steel, S. Mubareka, and P. Palese, “High Temperature (30°C) Blocks Aerosol but Not Contact Transmission of Influenza Virus,” *J. Virol.*, vol. 82, no. 11, pp. 5650–5652, Jun. 2008, doi: 10.1128/jvi.00325-08.
- [29] J. Biryukov *et al.*, “Increasing Temperature and Relative Humidity Accelerates Inactivation of SARS-CoV-2 on Surfaces,” *mSphere*, vol. 5, no. 4, Aug. 2020, doi: 10.1128/msphere.00441-20.
- [30] F. Serpilli, C. Di Perna, S. Di Loreto, and V. Lori, “Impact of mechanical ventilation systems on the indoor-air quality in highly energy-efficient houses.”
- [31] “D.P.C.M. 5 dicembre 1997 - Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici. Pubblicato in G.U. Serie generale n. 297 del 22 dicembre 1997.”

- [32] L. Chen *et al.*, “Estimation of the SARS-CoV-2 transmission probability in confined traffic space and evaluation of the mitigation strategies,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, pp. 1–13, Apr. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-13617-y.
- [33] *DM 5.07.1975.*
- [34] *DIN 1946-6: Ventilation and Air Conditioning. .*
- [35] “Norma UNI 10339 - Impianti aeraulici a fini di benessere.”

Tutte le immagini nel presente lavoro di Tesi sono state realizzate dal sottoscritto, ad eccezione della Figura 4.2 che è stata tratta (tramite acquisizione della schermata) dal pannello virtuale del recuperatore Aermec RTD11.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il relatore, Chiar.mo Prof. Costanzo di Perna, grazie al quale questo lavoro di Tesi è stato possibile. Lo ringrazio per la sua disponibilità nel corso del lavoro, sia per i suoi consigli, in particolar modo per avermi proposto questo titolo di Tesi, in quanto, durante la prima ondata di pandemia come studente del corso di “Impianti e Sistemi di Controllo” mi sono posto il problema di come si potesse diffondere il virus negli ambienti chiusi e in che modo la ventilazione meccanica controllata potesse rappresentare un problema, o “la cura” al rischio di contagio.

Desidero ringraziare il mio correlatore, il Dott. Ing. Luca Tarabelli che mi ha supportato e sopportato durante le fasi di monitoraggio e durante il percorso di questo lavoro.

Ringrazio i miei genitori e tutta la mia famiglia, i quali abbraccio virtualmente e calorosamente, in quanto mi hanno supportato durante questo importante percorso di crescita personale che è stata l’Università.

Concludo ringraziando tutti i miei amici, sia quelli fuori da questo contesto universitario, sia quelli all’interno di quest’ultimo, che non menziono perché sono veramente tanti e non vorrei dimenticarne nessuno. La Pandemia si è rivelata come un periodo difficile per tutti ma è dai momenti difficili che deve emergere il meglio di noi stessi.