POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

# Ruolo degli impianti di climatizzazione nella diffusione del SARS-CoV-2

Tesi inserita nell'ambito dell'emergenza da COVID-19

**Relatori**
prof. Marco Carlo Masoero
prof. Marco Simonetti

**Studente**
Alessandro Bondi
matricola: 259547

Novembre/Dicembre 2020

# Sommario

Questa tesi è inserita nell'ambito dell'emergenza sanitaria da COVID-19. In questo sommario si procede con la presentazione dei punti principali della tesi e si percorre il filo logico che ha portato al problema e alle soluzioni presentate.
Inizialmente si effettua un'analisi del patogeno e delle sue modalità di trasmissione, concentrandosi su quelle più legate con il trasporto aereo. Queste vengono prese in considerazione contestualmente al ruolo che giocano negli impianti di ventilazione più comuni. La prima parte tratta dunque dello studio fatto nei primi mesi della pandemia dalla comunità scientifica nazionale e internazionale e l'evoluzione delle conoscenze che si hanno sul SARS-CoV-2. Sono inoltre studiati e messi a paragone i numerosi protocolli di emergenza emessi dai vari enti regolanti per la manutenzione e l'utilizzo degli impianti di ventilazione. Questi si compongono di una serie di suggerimenti da mettere in atto per prevenire e ridurre il contagio negli ambienti. Si vedrà come diversi paesi hanno affrontato l'emergenza in maniera leggermente differente.
Successivamente, nella seconda parte, si va a presentare un caso studio di particolare importanza: la sede centrale di Corso Duca del Politecnico di Torino. Si riportano dunque le modalità con cui, nel contesto del mio ateneo, si sono attuate le procedure spiegate al punto precedente, i vantaggi che esse apportano e le criticità e contraddizioni che all'atto pratico vengono fuori. Lo studio è approfondito ancor di più, per la totalità degli ambienti, tramite il modello di calcolo di rischio di contagio proposto da Wells-Riley. Questo, risalente ormai al secolo scorso, è aggiornato e integrato con nuove conoscenze ed applicato al caso in analisi.
Infine, nella terza ed ultima parte, si passa ad una simulazione CFD e ad uno studio molto approfondito di un ambiente scelto *ad hoc*. Questo viene analizzato nel contesto della movimentazione dell'aria al suo interno e della diffusione delle particelle infettive che ne consegue. L'analisi è stata effettuata con due modalità di ventilazione installate sostanzialmente differenti, e dunque con conseguenze importanti sull'efficienza di lavaggio e altri parametri specifici. Nella parte di *post-processing* sono analizzati i risultati e fatte considerazioni di carattere generale e specifico.

# Summary

Initially the pathogen and its mode of transmission are analyzed, with a focus on airborne transport and the connection with the most common HVAC systems. The first part presents the work developed during the early stages of the pandemic by the national and international scientific community and the evolution of the knowledge about the SARS-CoV-2 virus. Several emergency HVAC protocols issued by the main international institutions are studied and put in comparison. These consist of a series of directions and suggestions to be implemented in order to reduce indoor spreading of the pathogen. Light differences between countries are highlighted.
In the second part a case study is presented: the main building of the Politecnico di Torino located in Corso Duca. The process of implementation of the aforementioned protocols is reported, with a focus on the advantages and issues that arise in practice. The analysis is further deepened by means of the contagion risk calculation model proposed initially in the last century by Wells and Riley. New updated versions are presented and applied to the case study.
Lastly a CFD simulation is presented. This consists of an in-depth analysis of a specially selected environment. The air motion in the room and the subsequent infectious droplets distribution are thoroughly described. The study includes two substantially different ventilation modes with direct consequences on ventilation efficiency and other specific parameters and puts them in comparison. In the post-processing section the results are presented and conclusions are drawn.

# Ringraziamenti

Se i ringraziamenti ai relatori, proff. Masoero e Simonetti, sono superflui in questa parte, perché decisamente sentiti e sottintesi, il candidato intende invece riportare apertamente la propria gratitudine per alcuni colleghi che non compaiono nel frontespizio.

Ringrazio sentitamente l'ing. `Ferdinando Facelli`, responsabile Edilog per gli interventi di manutenzione del Politecnico, per la disponibilità e gentilezza nei miei confronti ai primissimi inizi della tesi. Ha dimostrato un attivo interesse al mio lavoro e ha condiviso con me la sua conoscenza approfondita dei sistemi di ventilazione dell'ateneo, una sostanziale quantità di materiale e tutta la pazienza di cui potesse disporre.

Un secondo ringraziamento molto sentito va al prof.ing. `Costanzo di Perna`, professore associato di Impianti Termotecnici all'*Università Politecnica delle Marche*, nonché mio zio. I miei ringraziamenti esulano dal legame di parentela che ci unisce, ma si riversano sul lato professionale che, solamente grazie a questo lavoro, ho finalmente potuto approfondire ed apprezzare. Il contributo per il quale maggiormente lo voglio ringraziare in queste poche righe è di certo l'idea iniziale di proporre attivamente questa tesi ai miei relatori. Il suggerimento è infatti nelle fondamenta stesse di questo lavoro, che ha spalancato la porta al mio futuro. Segue poi la gratitudine per le profonde competenze e conoscenze che ha deciso di condividere con me e l'interessamento attivo che ha dimostrato durante l'intero svolgimento della tesi.

# Indice


**1 Il SARS-CoV-2 e le sue modalità di trasmissione** 9
1.1 I Coronaviridae e il COVID-19 . . . 9
1.1.1 SARS-CoV . . . 10
1.1.2 MERS-CoV . . . 11
1.1.3 SARS-CoV-2 . . . 11
1.2 La trasmissione del SARS-CoV-2 e il superspreading . . . 14
1.3 La modalità Airborne tramite Aerosol . . . 17
1.3.1 Gli Aerosol . . . 18
1.3.2 Meccanismi di produzione del bioaerosol . . . 20
1.3.3 Relazione con temperatura e umidità . . . 22
1.3.4 Relazione col particolato atmosferico . . . 27
1.3.5 Effetti della radiazione elettromagnetica . . . 31
1.4 La controversia sul SARS-CoV-2 . . . 32
1.4.1 L'Infodemia da COVID-19: il COVID non è airborne . . . 32
1.4.2 L'anello mancante: il COVID è airborne . . . 34
1.4.3 Riepilogo . . . 35

**2 I protocolli di manutenzione degli impianti di climatizzazione** 37
2.1 La pandemia da SARS-CoV-2 . . . 37
2.1.1 La situazione italiana . . . 37
2.1.2 La situazione nel mondo . . . 40
2.1.3 Precauzioni igieniche e strategie di prevenzione . . . 43
2.2 La discussione sugli impianti di ventilazione . . . 46
2.2.1 Il caso del ristorante cinese . . . 46
2.3 I protocolli AICARR . . . 48
2.3.1 La ventilazione e il contagio . . . 49
2.3.2 Ulteriori considerazioni . . . 52
2.3.3 La questione dei recuperatori di calore . . . 55
2.3.4 Tipologie impiantistiche . . . 57
2.3.5 Strategie di pulizia e disinfezione . . . 58
2.4 I protocolli ASHRAE . . . 59
2.4.1 Building Readiness: operazioni preliminari . . . 61

2.4.2 Building Readiness: interventi HVAC . . . 63
2.4.3 Le strategie di recupero energetico . . . 64
2.4.4 La questione della filtrazione: introduzione generale . . . 67
2.4.5 La questione della filtrazione: i protocolli . . . 71
2.5 Altri enti e protocolli . . . 73
2.5.1 I protocolli REHVA: una posizione più conservativa . . . 74
2.5.2 I protocolli BESA: gli impianti a ricircolo locale . . . 76
2.5.3 I rapporti ISS: la velocità dell'aria in ambiente . . . 79
2.6 Riepilogo . . . 81

**3 Le aule del Politecnico** 85
3.1 Procedure operative e parametri d'interesse . . . 85
3.1.1 Le UTA del Politecnico . . . 85
3.1.2 Ispezione delle UTA . . . 92
3.1.3 Misura della portata: introduzione . . . 95
3.1.4 Misura della portata: procedura pratica . . . 96
3.1.5 Ulteriore documentazione prodotta . . . 102
3.2 Gli interventi applicativi . . . 105

**4 Il modello del rischio di contagio** 109
4.1 La teoria di Wells e Riley . . . 109
4.1.1 Il modello WR . . . 110
4.1.2 I parametri variabili . . . 112
4.2 Nuovi approcci e integrazioni . . . 115
4.2.1 Il ricambio d'aria equivalente . . . 116
4.2.2 Altre formulazioni del rischio di contagio . . . 117
4.3 Applicazioni alle aule del Politecnico . . . 120
4.3.1 Scelta delle costanti di interesse . . . 120
4.3.2 Le variabili per ogni aula . . . 122
4.3.3 Calcolo delle funzioni di rischio . . . 123
4.4 Risultati e conclusioni . . . 132
4.4.1 Rispetto dei requisiti minimi . . . 132
4.4.2 Numero di riproduzione di base . . . 134

**5 Simulazioni applicative: teoria preliminare** 139
5.1 Introduzione . . . 139
5.1.1 Software utilizzato . . . 139
5.1.2 Ripasso della teoria: Fluid Flow . . . 140
5.1.3 Ripasso della teoria: Lagrangian Multiphase Flow . . . 144
5.2 Descrizione preliminare del problema . . . 147
5.2.1 Comportamento macroscopico dell'aria . . . 148
5.2.2 Comportamento macroscopico degli occupanti . . . 149
5.2.3 Comportamento miscroscopico delle droplets . . . 150

**6 Impostazione delle simulazioni applicative** 157
6.1 Costruzione della Geometria . . . 157
6.2 Fisica e condizioni al contorno . . . 161
6.3 Mesh e Studio di Indipendenza . . . 165
6.3.1 Studio di indipendenza della mesh . . . 166
6.4 Fasi Lagrangiane e Injector . . . 171
6.5 Run della Simulazione . . . 173

**7 Post-processing e analisi dei risultati** 177
7.1 Moto dell'aria e temperatura . . . 177
7.2 Distribuzione del rischio di contagio . . . 178
7.2.1 Procedura pratica: STAR-CCM+ . . . 183
7.2.2 Procedura pratica: Excel e MatLab . . . 185
7.2.3 Procedura pratica: produzione dei risultati . . . 189
7.3 Analisi dei risultati . . . 190
7.3.1 Velocità delle particelle . . . 193
7.3.2 Compartimentazione dei flussi . . . 194
7.3.3 Rischio di contagio effettivo . . . 194
7.3.4 Commenti e conclusioni . . . 197

**Bibliografia** 199

**Sitografia** 203

*Good morning, good afternoon and good evening. This Thursday marks six months since WHO declared COVID-19 a public health emergency of international concern. This is the sixth time a global health emergency has been declared under the International Health Regulations, but it is easily the most severe. Almost 16 million cases have now been reported to WHO, and more than 640,000 deaths. And the pandemic continues to accelerate. In the past 6 weeks, the total number of cases has roughly doubled. [. . . ] COVID-19 has changed our world. It has brought people, communities and nations together, and driven them apart. It has shown what humans are capable of – both positively and negatively. We have learned an enormous amount, and we're still learning. But although our world has changed, the fundamental pillars of the response have not: political leadership, and informing, engaging and listening to communities. And nor have the basic measures needed to suppress transmission and save lives: find, isolate, test and care for cases; and trace and quarantine their contacts.* ***Keep your distance from others, clean your hands, avoid crowded and enclosed areas, and wear a mask where recommended****. Where these measures are followed, cases go down. Where they're not, cases go up.*

[estratto da: WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 27 July 2020]

# Capitolo 1

# Il SARS-CoV-2 e le sue modalità di trasmissione

## 1.1 I Coronaviridae e il COVID-19

Alla fine di Dicembre del 2019 viene segnalato per la prima volta a Wuhan, in Cina un nuovo Coronavirus con potenzialità letali negli esseri umani. Il patogeno viene denominato 2019-nCOV abbreviazione per *novel-coronavirus-2019*. Da allora il virus si è diffuso ampiamente sia in Cina, che nel resto del mondo. Solo alla fine di Gennaio del 2020 il direttore generale dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) dichiara lo stato di emergenza globale (`Public Health Emergency of International Concern, PHEIC`), ovvero il livello di allarme più alto assumibile. Agli inizi di Marzo 2020 il COVID-19 assume ufficialmente lo status di *pandemia* e i casi conclamati superano il migliaio in tutto il mondo, con Cina e Italia paesi più colpiti.
Il `SARS-CoV-2` (*Severe Acute Respiratory Syndrome*) appartiene alla famiglia più ampia dei *Coronavirus*. Questi sono RNA-virus caratterizzati da un involucro esterno lipidico ricco di protuberanze proteiche superficiali, i quali causano malattie respiratorie di gravità estremamente variabile, dal semplice raffreddore comune a polmoniti potenzialmente fatali. Il loro nome deriva dal fatto che, sottoposti ad una microscopia elettronica, assomigliano alla corona solare. Negli anni 30 questi erano stati per la prima volta identificati nel pollame domestico ed erano noti per causare patologie di natura eterogenea: dalle malattie respiratorie (per cui sono conosciuti negli esseri umani) a quelle gastrointestinali, ma anche epatiche e neurologiche.
L'infezione da Corona-virus negli umani (`HCoV`) può essere causata da 7 tipologie di patogeni differenti. Di questi sette, quattro sono all'origine di infezioni delle vie respiratorie superiori lievi e autolimitanti e si manifestano con la sintomatologia tipica del raffreddore comune. In alcuni casi più rari possono comportare delle

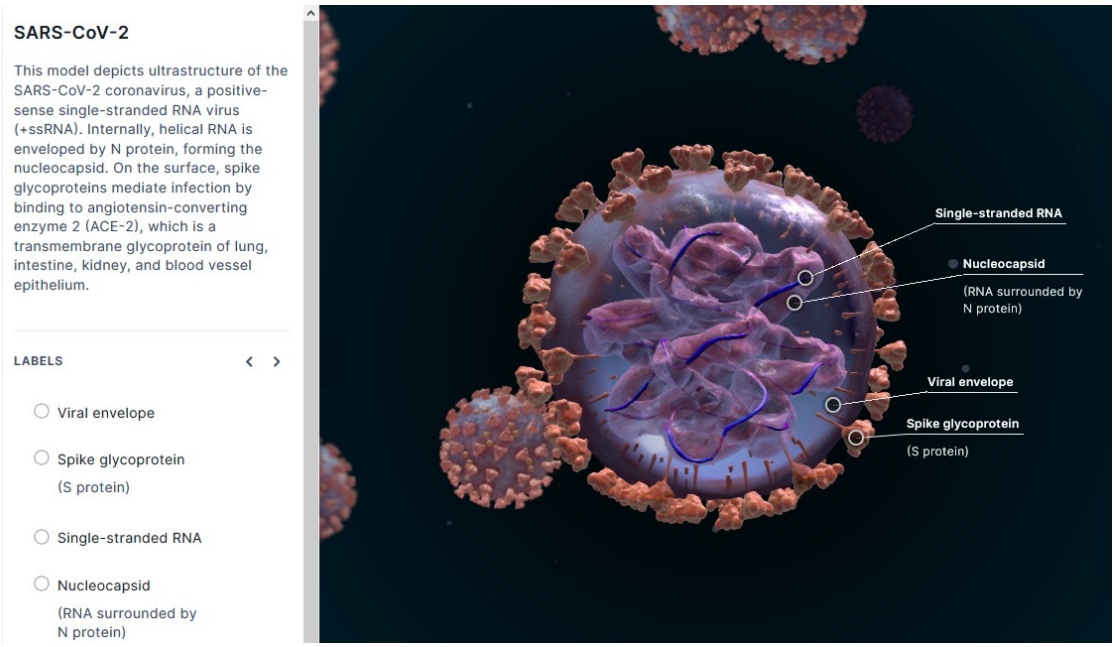



Figura 1.1: Modello 3D del SARS-CoV-2

complicazioni più serie nei pazienti più suscettibili quali i neonati, le persone anziane e gli immunodepressi. I restanti tre ceppi virali sono invece responsabili di decorsi più gravi a carico principalmente del polmone e delle basse vie respiratorie ed in passato hanno già causato epidemie più diffuse a livello globale. Sono ormai noti per la loro elevata pericolosità e trasmissibilità.

### 1.1.1 SARS-CoV

Il SARS-CoV è la prima di queste tre varianti di Coronavirus. Si manifesta come una malattia simil-influenzale e può comportare gravissime insufficienze respiratorie progressive. Anch'essa inizialmente identificata nella Cina Meridionale alla fine del 2002, ha contagiato più di 8000 persone con una mortalità attestata intorno al 10%, valore risultato da una media tra categorie di persone con suscettibilità sostanzialmente differenti. Questa prima epidemia ha fatto sì che il mondo venisse a conoscenza del pericolo presentato da questa tipologia di patogeni. Sebbene ormai dal 2004 casi di questo specifico virus non siano segnalati, lungi la patologia dall'essere debellata, per via della sua origine animale, nei quali è possibile sia presente una riserva da cui potrebbe eventualmente riemergere.

### 1.1.2 MERS-CoV

Il secondo Coronavirus che rientra nella definizione di `HCoV` è il MERS, che prende il suo nome direttamente dalla zona di maggior contagio (*Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus*). Esso si è diffuso infatti per la stragrande maggioranza (85% dei casi totali) nella penisola arabica nel 2012 con una mortalità piuttosto elevata, attestatasi attorno al 35%. Il secondo focolaio riconosciuto è stato quello nella Repubblica di Corea nel 2015, associato ad un viaggiatore di ritorno dal medio oriente. Analogamente al SARS-CoV si ha un serbatoio di infezione di natura animale. In questo caso si ritiene sia legato principalmente ai dromedari. Con un periodo di incubazione intorno ai 5 giorni, la patologia conduce anche a complicazioni gastrointestinali in circa un terzo dei pazienti e non è ancora stato sviluppato un vaccino funzionante. Il trattamento è più che altro di supporto e di limitazione e tracciamento del contagio.

### 1.1.3 SARS-CoV-2

Il SARS-CoV-2 è il virus responsabile della malattia COVID-19. Questa si manifesta con una sintomatologia che ormai si è abituati ad attribuire ad una patologia di natura virale:

- Iperpiressia (febbre alta $\geq 39°C$)
- Tosse secca, più raramente produttiva
- Dispnea (difficoltà respiratorie)
- Brividi e tremori
- Mialgia e artralgia (dolori muscolari e alle articolazioni)
- Cefalea (mal di testa)
- Faringodinia e mal di gola
- Iposmia (o anosmia) e ageusia (perdita del gusto e dell'odorato)
- Malessere generale diffuso

Il suo tempo di incubazione va dai 2 ai 12 giorni e la precauzione primaria in caso di manifestazione di sintomi o qualora si sapesse di essere entrati in contatto con soggetti infetti è l'auto isolamento per un periodo di due settimane (che quindi supera il massimo di incubazione). Il rischio di complicazioni e di nascita di forme più gravi di COVID-19 è legato all'età e alla presenza di malattie pregresse (ad esempio cardiopatie, pneumopatie o diabete). La malattia promuove la nascita di una polmonite progressivamente più grave che può comportare `ARDS` (*Sindrome da*

*Distress Respiratorio Acuto*) nei soggetti più fragili e co-infezioni batteriche dalle conseguenze più disparate (insufficienza renale, ischemia del miocardio, ecc...).
Per quanto riguarda i test diagnostici preliminari, il primo indicatore di positività risulta essere la temperatura corporea, ma questa si manifesta in concomitanza con altra sintomatologia e quindi a valle del periodo di incubazione. Il CDC (*Center for Disease Control and Prevention*) raccomanda di raccogliere un singolo tampone nasofaringeo dal tratto respiratorio superiore. Questo risulta imperativo in tutte quelle persone che hanno viaggiato in zone a rischio ed è solitamente seguito dal periodo di auto isolamento già precedentemente nominato. È possibile anche effettuare un test sierologico, della stessa natura di quello nasofaringeo, per constatare la presenza degli anticorpi necessari a debellare la patologia. La decisione di effettuare il test o meno segue le linee guida del CDC: è fortemente indicato per tutti i pazienti che presentano sintomatologia attiva, ma anche nei soggetti che sono entrati in contatto con casi conclamati entro 14 giorni dall'esordio dei sintomi. Si invita anche a controllare ed effettuare i test necessari per individuare altre patologie respiratorie simili, sempre che queste siano epidemiologicamente appropriate.
Il trattamento è quello di supporto alla luce del fatto che mancano vaccini, farmaci antivirali efficaci o altri trattamenti di natura specifica. Per limitare il contagio si fa dunque affidamento su:

- Precauzioni respiratorie.
  Queste prevedono l'uso di DPI (Dispositivi di Protezione Individuale), come ad esempio mascherine N-95 o chirurgiche. Le prime sono "a tenuta", ciò significa che proteggono l'individuo da particelle in ingresso e devono dunque essere indossate da tutti coloro che sanno di venire in contatto con soggetti infetti, come ad esempio i lavoratori sanitari. Se durante una pandemia, questo tipo di dispositivi può venire a scarseggiare, è fondamentale la determinazione di un criterio corretto di priorità con cui deve avvenire la distribuzione. Le mascherine chirurgiche invece sono indicate per soggetti di qualunque natura poiché sono efficaci a contenere la carica infettiva emessa dall'individuo, ma contrariamente alle precedenti non riescono a proteggere bene dagli agenti esterni.

- Precauzioni di contatto.
  Queste raccolgono una serie di comportamenti indicati per la riduzione della trasmissione primaria diretta o secondaria tramite superfici infette. Dunque il CDC consiglia di evitare il contatto stretto con persone infette e di toccarsi naso, bocca e occhi con mani che non siano state accuratamente lavate, cosa che andrebbe fatta spesso e per almeno 20 secondi con disinfettanti a norma. Le superfici ad alto tasso di contatto in luoghi pubblici (maniglie, pomelli, pulsanti di ascensori, corrimano, ecc...) devono essere pulite frequentemente con panni monouso.

| Nome | Genere | Sintomatologia tipica |
|---|---|---|
| HCoV-OC43 | BetaCoronavirus | Raffreddore, sindrome simil-influenzale |
| HCoV-HKU1 | BetaCoronavirus | Raffreddore, sindrome simil-influenzale |
| HCoV-229E | AlphaCoronavirus | Raffreddore, sindrome simil-influenzale |
| HCoV-NL63 | AlphaCoronavirus | Raffreddore, sindrome simil-influenzale |
| MERS-CoV | BetaCoronavirus | Sindrome Respiratoria Medio-Orientale |
| SARS-CoV | BetaCoronavirus | Sindrome Respiratoria Acuta Grave |
| SARS-CoV-2 | BetaCoronavirus | Grave polmonite interstiziale, SARI e ARDS |

SARI = Severe Acute Respiratory Infection; ARDS = Sindrome da Distress Respiratorio Acuto

*Fonte dei dati. Rielaborazione Istituto Superiore di Sanità, Epicentro. Modificata da: Ricciardi W, Moscato U, Laurenti P, D'Ambrosio F, Villani L. Pandemia SARS-COV-2 Manuale COVID-19, Idelson-Gnocchi, 2020 in corso di pubblicazione.*

Figura 1.2: Nome, genere e sintomatologia più comune dei sette coronavirus umani. Tabella da [3]

- Quarantena.
  La quarantena, ovvero il periodo di auto isolamento, è essenziale. Questa può avvenire in ospedale o nelle proprie abitazioni a seconda della gravità del decorso della malattia.

La serietà del contagio da COVID-19 risiede nella sua tendenza a promuovere nei soggetti suscettibili, specie in quelli in cui sono presenti co-morbosità, una grave reazione infiammatoria con conseguenze a livello clinico disastrose, ma la cui analisi esula da questo testo. La sua diffusività è invece legata alla totale assenza da parte della popolazione di una memoria immunologica adeguata, con conseguente mancanza da parte del sistema immunitario dell'organismo di una risposta adatta. In confronto alle altre due malattie indicate, il SARS-CoV-2 ha una mortalità comprovata di numerosi punti percentuali inferiore (si attesta intorno al $4-6\%$), ma presenta una contagiosità sostanzialmente aumentata ($R_0 > 2.5$, dove con il termine $R_0$ si intende il *"numero di riproduzione base"* ovvero il numero medio di infezioni secondarie prodotte da ciascun individuo infetto). Per confronto all'inizio della pandemia si è stimato un *numero di riproduzione di base* $R_0$ tra il 2.2 e 3.5, mentre valori comprovati per l'influenza stagionale si attestano su $R_0 = 1.3$ e per il morbillo $R_0 = 12 \div 18$.

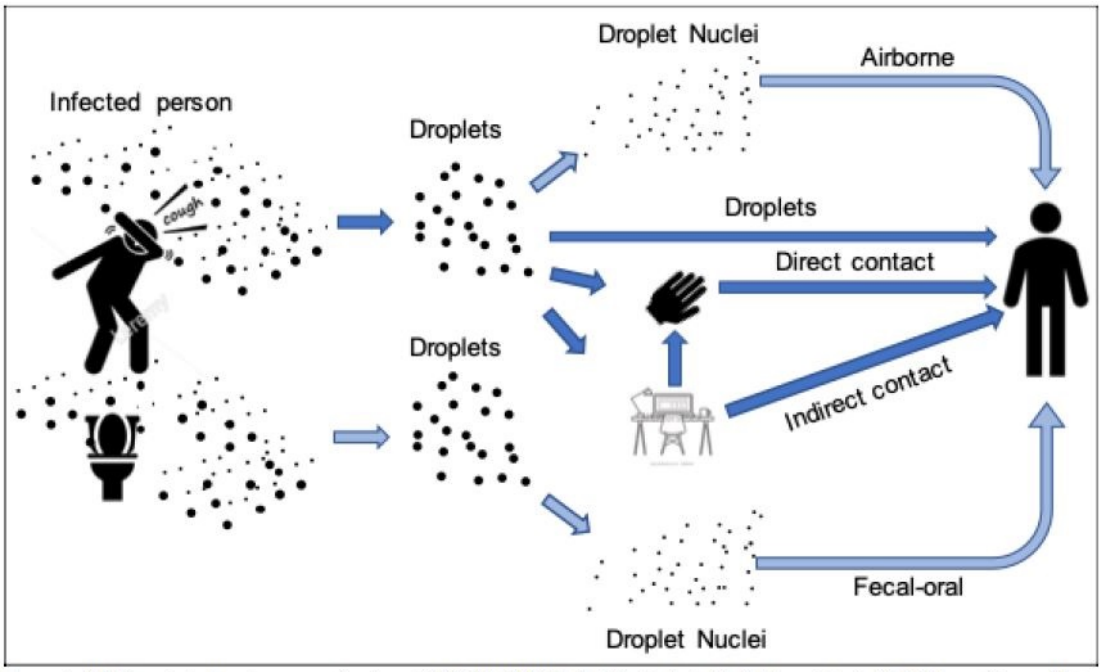



Figura 1.3: Principali modalità di trasmissione del SARS-CoV-2. Figura da [4]

## 1.2 La trasmissione del SARS-CoV-2 e il super-spreading

Quando si tratta di un nuovo virus, se sintomatologia, diagnosi e trattamento sono i tre capisaldi da tenere in conto per combatterne l'effetto nei soggetti infetti, lo studio di come il patogeno viene trasmesso tra gli organismi è di fondamentale centralità quando se ne vuole prevenire la diffusione. Nel caso del COVID-19 questo è stato oggetto di forti discussioni. Il principale responsabile della trasmissione è l'RNA virale: questo è molto instabile e può sopravvivere solo in condizioni ben stabilite e inattivato con mezzi molto semplici (ad esempio un po' di alcol). Lo studio epidemiologico può avvalersi del parametro *tempo di decadimento* (ovvero di dimezzamento di presenza di RNA virale) per stabilire l'infettività della patologia. La principale fonte di infezione risultano essere le *droplets*. Esse si compongono di goccioline di saliva e secrezioni espulse dalla parte superiore delle vie aeree di un soggetto contagioso. Se queste risultano particolarmente ridotte durante le attività leggere di respirazione, il loro quantitativo aumenta sostanzialmente durante il parlato oppure a seguito di colpi di tosse o starnuti. In linea di principio l'infezione da COVID può essere a causa di:

- **Contatto diretto**
  Si riferisce generalmente alla trasmissione per vie di baci o altro scambio di secrezioni orali, attività sessuale, ferite cutanee aperte o altre rotte come ad esempio trasfusioni sanguigne o iniezioni endovenose.

- **Contatto indiretto**
  Questa tipologia segue la teoria che il virus sopravvive per un determinato periodo sugli oggetti. La durata di tale periodo dipende dal tipo di superficie. È plausibile che entrando in contatto con superfici infette e poi toccandosi il volto, parte della carica virale possa entrare nell'organismo ed infettare il soggetto.

- **Trasmissione fecale-orale**
  Sebbene ancora al centro di discussione questa tipologia di trasmissione è stata già confermata per altre malattie di natura *"coronavirale"* e non si esclude in questo testo che possa essere effettivamente confermata anche per il SARS-CoV-2. Molti studi indicano la presenza di RNA virale nelle feci dei soggetti infetti, ma non si riportano casi notevoli di diffusione secondo questa modalità.

- **Trasmissione aerea**

  – tramite ***droplets pesanti***: inspirazione diretta di *droplets* pesanti ($d \geq 10\mu m$) contenenti virus ancora vivi emesse da persone contagiose entro il raggio di azione di $\approx 1m$ a seguito di colpi di tosse o starnuti. Questa modalità, per la sua importanza, viene solitamente indicata con il nome di `contagio diretto`, e in ogni caso rappresenta **la principale via di trasmissione** del COVID-19.

  – tramite **aerosol**: seconda, ma sicuramente non per importanza, la trasmissione aerea per via Airborne (sospensione in aria di *droplet nuclei* con $d \leq 5\mu m$) resta il centro di forti discussioni. Inizialmente rinnegata dall'OMS, sta ora prendendo più piede e la comunità scientifica sta accettando l'idea che possa effettivamente giocare un ruolo, specie negli ambienti chiusi dove il ricircolo d'aria scarseggia. Poiché questo tipo di trasmissione è la più importante nello studio degli impianti di climatizzazione, che possono essere efficacemente utilizzati per interromperla, verrà affrontata in seguito in maniera molto dettagliata.

- **Altre modalità**

  – Via oculare.
  È comprovata la modalità di trasmissione per secrezioni oculari (ad es. lacrime o prodotti della congiuntivite)

  – Via verticale.
  La trasmissione verticale, ovvero tra genitore e figlio è ancora in via di

studio. Si esclude però in ogni caso la trasmissione per via sessuale, nella stessa modalità per cui altre `STD`s prolificano (ad esempio l'AIDS)

Un'altra incognita che andrebbe tenuta in considerazione sono i cosiddetti *superdiffusori* (dall'inglese più elegante: *superspreader*). È noto che la carica virale per infettare una persona richiesta è estremamente ridotta nel caso del COVID-19, ma che quelle effettivamente emesse da un soggetto infetto variano in maniera sostanziale a seconda non solo dell'attività svolta (come già indicato), ma anche delle caratteristiche intrinseche dell'organismo (ad esempio corporatura, salute delle vie aeree superiori, ecc ...) e del comportamento corretto di prevenzione (ad esempio il contatto con altre persone in spazi chiusi e mal ventilati o procedure di auto isolamento improprie). Questi individui sono caratterizzati da una forte presenza di cariche virali emesse durante il periodo di incubazione della malattia e una totale assenza di sintomatologia. Ciò ha fatto sì che tali *superspreaders* abbiano giocato dei ruoli fondamentali nella nascita di alcuni focolai di SARS e MERS nel passato. In generale eventi di *superpsreading* avvengono a seguito di ogni pandemia. Si riportano alcuni esempi:

- Un uomo britannico è diventato un *superspreader* dopo aver contratto il COVID ad una conferenza a Singapore alla fine di Gennaio del 2020. La partecipazione internazionale a tale convegno ha fatto concentrare in un unico luogo persone provenienti da ogni parte del globo, inclusa la provincia di Hubei. L'uomo ha proceduto poi a spostarsi sulle Alpi Francesi dove ha contagiato altri individui prima di tornare in Inghilterra tramite la Svizzera. È chiaro come sulla sua strada abbia potuto incontrare persone da ogni dove e generare numerosi eventi di contagio e focolai

- La Diamond Princess Cruiser Ship è una nave da crociera che è stata luogo di un grosso focolaio di `nCoV-19`. Tra i suoi passeggeri un uomo di Hong Kong è risultato positivo al test nasofaringeo. Negli ambienti stretti e confinati all'interno della lussuosa nave di linea non è stato possibile mantenere un accorto sistema di distanziamento sociale, nè al tempo se ne pensava ci fosse il bisogno. I casi conclamati sono stati 454. Si può dunque estendere il ragionamento a ogni luogo dove l'angustia degli ambienti non possa permettere un buon rispetto delle norme come prigioni, chiese e cappelle, navi da crociera ed altro ancora.

- Infine per citare un caso famoso concernente il SARS-CoV-1 (o semplicemente SARS-CoV da non confondere con il COVID-19) si parla brevemente dell'hotel Amoy Garden di Hong Kong. In questo caso la trasmissione si pensa sia stata conseguenza di un'impropria manutenzione dell'impianto di estrazione dell'aria viziata dai bagni. Alcune particelle infette atomizzate durante lo scarico delle toilette possono essere state introdotte nelle condotte di mandata

agli ambienti per mezzo di tenute non stagne. Per quanto riguarda il SARS-CoV la trasmissione di tipo oro-fecale è confermata e all'Amoy Garden si è assistito ad un evento di forte contagio.

## 1.3 La modalità Airborne tramite Aerosol

Come già indicato nella parte precedente, la modalità di trasmissione che più riguarda gli impianti di climatizzazione è quella aerea tramite aerosol o *airborne*. Questa infatti risulta essere la più importante nella diffusione dei contagi (laddove sia stata dimostrata) e ha il suo maggior effetto negli ambienti *indoor*, dove già i virus (sia quelli che attaccano l'apparato respiratorio, ma anche quelli dell'apparato gastrointenstinale) sono la principale causa di infezioni. Essa si basa principalmente su quelle che a più riprese nel testo abbiamo definito *droplets*. La traduzione letterale dalla lingua inglese è *gocciola, gocciolina*. Queste rappresentano tutte le particelle contenenti acqua che vengono espulse durante le normali attività metaboliche di un organismo, ma anche in situazioni particolari come il parlato oppure un colpo di tosse. Sono controllate da leggi fisiche, le quali impongono su di esse dei comportamenti sostanzialmente differenti in maniera fortemente dipendente dalle loro dimensioni. Questo argomento risulta estremamente complesso, ma soprattutto coinvolge una lunga serie di discipline diverse (ad esempio la microbiologia, l'epidemiologia, la medicina, l'ingegneria, la fisica, ecc. . . ). A ragion di questo fatto la ricerca a riguardo è ancora scarseggiante e l'interesse della comunità scientifica sta prendendo piede solo in questo ultimo periodo (alla luce della pandemia tutt'ora in corso). L'importanza della ricerca verte su una serie di parametri quali:

- il tipo di virus e i suoi effetti sulla salute dei partecipanti
- le modalità di uscita dal corpo
- il livello di concentrazione di aerosol emesso dalle persone infette e respirato dai suscettibili
- la carica virale effettivamente contenuta nelle particelle *airborne*
- la distribuzione nell'ambiente e le dimensioni delle particelle di aerosol e virali
- le caratteristiche dell'ambiente (temperatura, umidità, concentrazione di particolati, ecc. . . )
- operazioni di ventilazione (tasso di ricambio aria esterna)
- operazioni di climatizzazione (in raffrescamento e in riscaldamento)
- comfort termico degli occupanti suscettibili
- . . .

### 1.3.1 Gli Aerosol

Con il termine aerosol si fa riferimento a tutta una serie di composti sospesi in aria, le cui dimensioni posso variare dal millesimo di micrometro fino al millimetro. Si parla di aerosol alla compresenza di due fasi distinte, dove la prima rimane in sospensione in una matrice della seconda. Tutti quegli aerosol di natura virale (o comunque organica) vengono chiamati *bioaerosol*. Per semplicità nel testo che segue anche il prodotto della respirazione metabolica (e dunque una categoria di prodotti che rientra nella definizione appena indicata) verrà chiamato solo *aerosol*. La loro origine può essere eterogenea:

- processi meccanici (come ad esempio lavorazioni su materiali e sospensione di polveri sottili)
- processi chimici (sospensione di solfati, nitrati o altre tossine, combustione, nucleazione, processi fotochimici, ...)
- natura virale (ad esempio l'influenza, il morbillo, la varicella, ...)
- natura batterica (Clamidia, Tubercolosi, Legionella, ...)
- natura fungina (Aspergillo, ...)
- ...

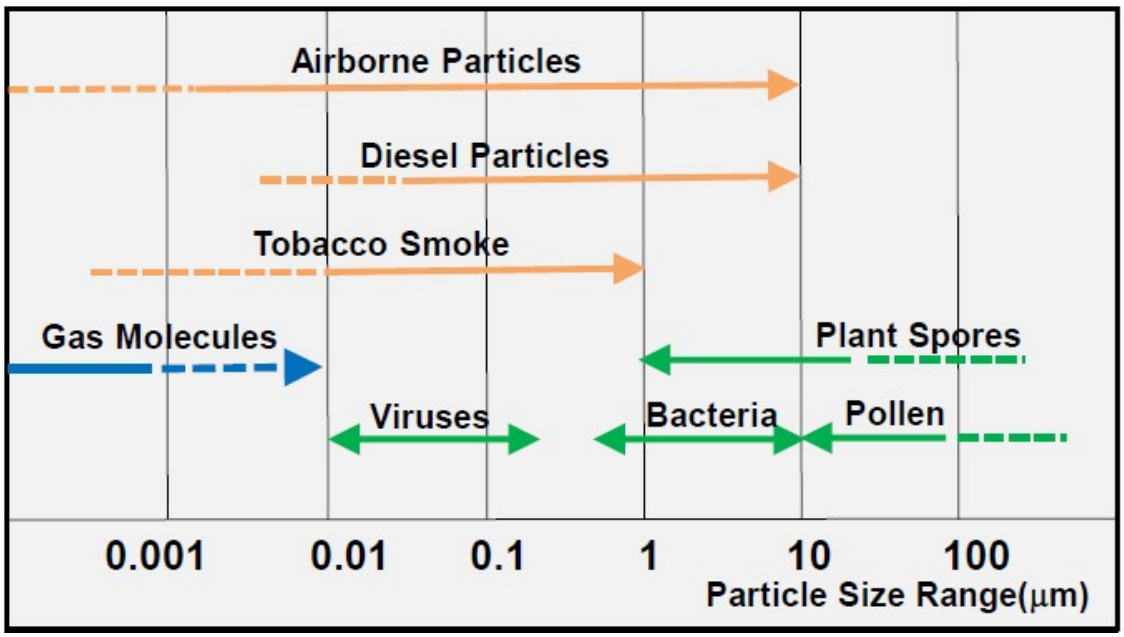



Figura 1.4: Dimensione delle particelle e natura. Da [6]

A seconda del tipo di particella sospesa, il comportamento varia. Come già detto sono le dimensioni che dettano legge poiché hanno il maggior effetto sulle forze che si scambiano le *droplets* con la matrice d'aria. Nello specifico vengono identificati due gruppi di forze che storicamente hanno giocato un ruolo importante nella fisica: quelle superficiali e quelle volumiche. Le prime riguardano l'interazione diretta tra fasi. L'aria che le circonda imprime il suo moto alle *droplets* sospese e ne modifica la direzione (teoricamente parlando avviene anche il viceversa, ma spesso è un lato che può essere del tutto tralasciato). Tra queste se ne possono ricordare alcune:

- `Drag Force`: la forza che l'aria imprime direttamente sulla *droplet*. Può anche essere chiamata "resistenza aerodinamica"

- `Lift Force`: la fase dispersa (nel nostro caso gli aerosol) riceve dalla matrice continua (l'aria) una spinta proporzionale alla sua velocità, in direzione perpendicolare ad essa. Questa risulta dalla teoria del galleggiamento.

- `Inertial force`: questo ultimo termine può anche essere trascurato e rappresenta l'inerzia della massa d'aria spostata dalla gocciolina nel suo tragitto.

Le forze volumiche sono invece di natura piuttosto complessa (elettromagnetica, chimica, nucleare, ...) e vale la pena nominare solo la più importante: la forza di gravità. Analizzandone dunque l'entità è possibile giungere a due principali conclusioni:

- $f_{sup} > f_{vol}$: nel caso in cui le forze superficiali che spingono verso l'alto superino in valore assoluto la forza di gravità si parla di particella airborne. Questa tende a seguire il moto della matrice e può dunque essere controllata dagli impianti di ventilazione. Questa prima situazione avviene per diametri molto piccoli: la spiegazione deriva dal fatto che le prime forze sono proporzionali alla superficie della droplet mentre le seconde al volume. Qualora il diametro sia sufficientemente ridotto l'effetto di riduzione delle volumiche è più importante di quello delle superficiali.

- $f_{sup} < f_{vol}$: alternativamente è possibile che, se le dimensioni superino un valore critico, la forza di gravità abbia la meglio e la particella abbia un moto parabolico verso il basso, tanto più stretto quanto maggiore il volume. Queste sono le cosiddette *heavy droplets* e rappresentano in ogni caso la maggioranza di particelle emesse dagli esseri umani.

È quindi possibile definire un tempo di caduta delle particelle sospese in funzione del loro diametro. L'immagine 1.6 è il risultato di uno studio americano. È possibile trovare tanti studi che confermano e confutano questi valori specifici, alla luce del fatto che la ricerca è ancora lungi dall'essere unanime.

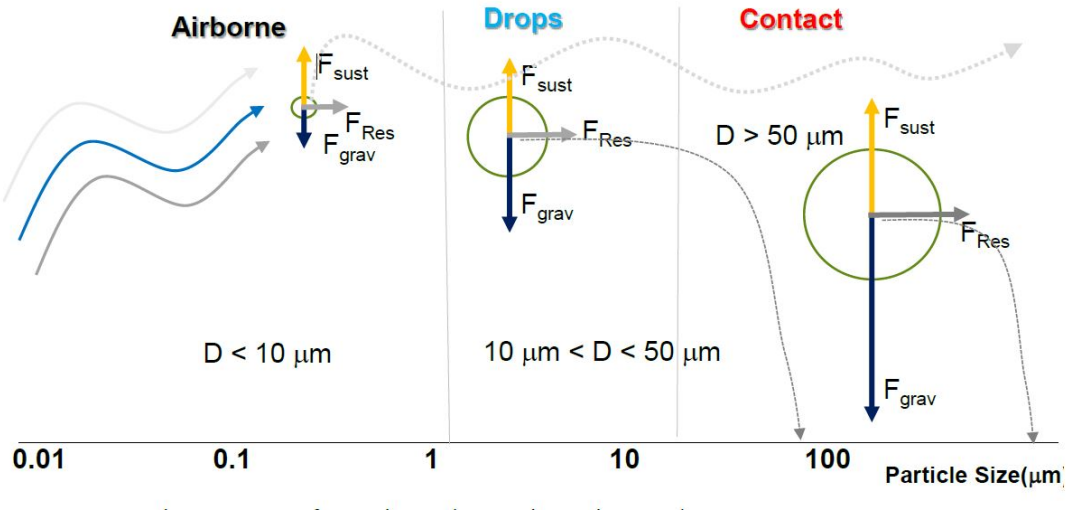



Figura 1.5: Forze scambiate tra droplet e matrice. Da [6]

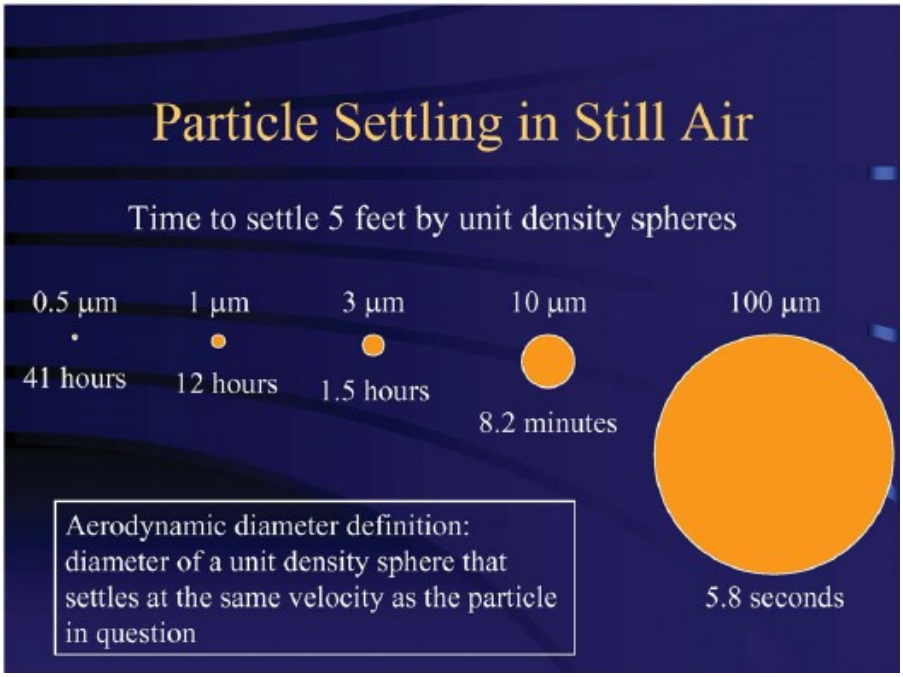



Figura 1.6: Tempo di caduta in funzione del diametro. Da [7]

### 1.3.2 Meccanismi di produzione del bioaerosol

Durante le attività metaboliche l'organismo produce una quantità di *droplets* di diverse dimensioni, le quali possono essere poi espulse dalle alte vie respiratorie

secondo il processo di atomizzazione. Questo prevede il passaggio di aria ad una sufficiente velocità che "solleva" le particelle di liquido depositate su una superficie. Questo *sollevamento* può provocare la formazione di goccioline di un diametro anche inferiore ai $5\mu m$. Inoltre, durante l'espulsione di *droplets* per via di atomizzazione o per colpi di tosse o starnuti (nei quali l'aria espulsa dall'apparato respiratorio può raggiungere velocità anche molto elevate $10 \div 30\ m/s$), sebbene la distribuzione dei diametri sia orientata verso particelle più pesanti, queste possono subire una *disseccazione* una volta uscite dall'organismo e sottoposte alle condizioni climatiche esterne. Tale processo prevede l'evaporazione della parte più esterna della gocciolina, lasciando in sospensione nell'aria solo quanto ormai è conosciuto dalla comunità scientifica come *droplet nucleus*. Il SARS-CoV-2 ha un diametro

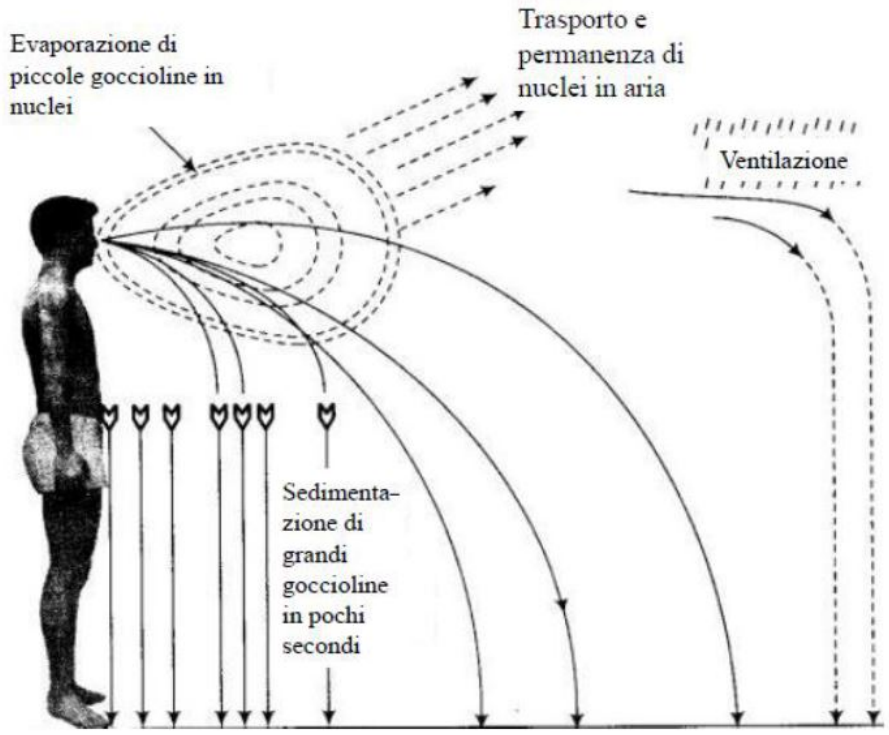



Figura 1.7: Meccanismo di produzione e trasporto dei *droplet nucleii*. Da [8]

ipotizzato che varia tra gli 80 e i $140nm$. Ciò lo rende adatto ad essere trasportato per mezzo di *droplet nucleii*. Nel caso in cui parte dell'aerosol risulti effettivamente infetto (presenza di virus ancora attivi), si può ufficialmente parlare di *trasmissione del contagio airborne*. Il fatto che la quantità di carica virale effettivamente trasportabile da tali particelle microscopiche non sia ancora nota e che la conseguente

possibilità di contagio sia messa in forte discussione verrà affrontato nel capitolo seguente. La pericolosità dell'aerosol infetto prodotto da un organismo durante specifiche attività dipende da numerosi fattori come:

- numero di *droplets* prodotte
- dimensioni delle *droplets* prodotte
- contenuto di carica virale
- frequenza di compimento dell'attività

La variabilità che si ottiene nelle diverse attività dipende in prima battuta dal luogo di origine delle *droplets* all'interno dell'apparato respiratorio. È logico pensare che il processo di atomizzazione avviene in maniera più sostanziale laddove le sezioni di passaggio dell'aria sono ridotte, con conseguenti velocità maggiori. Alcuni esempi sono: la parte frontale della cavità orale, la gola, la glottide, i bronchi e il condotto nasale. Tra quelli nominati, il primo esempio risulta essere quello dove sono più numerose restrizioni di sezione (la presenza della lingua, delle labbra e dei denti).

### 1.3.3 Relazione con temperatura e umidità

Due delle prime condizioni che impattano sulla produzione e "sopravvivenza" del bioaerosol in ambiente sono temperatura e umidità. Ciò risulta essere già particolarmente importante nell'ambito di questa tesi in quanto i parametri in questione sono solitamente regolati dagli impianti di climatizzazione e possono essere modificati sostanzialmente tramite controlli più sofisticati oppure per mezzo dell'introduzione in ambiente di apparecchi appositi. Il fatto quindi, che la trasmissione airborne sia suscettibile a tali modifiche, verrà in seguito ritrovato e riaffrontato nel tema dei protocolli di sicurezza e controllo delle strutture HVAC. Riprendendo l'immagine 1.3 e **??**, nonché quanto già detto nella sottosezione precedente possiamo concludere che il meccanismo principale di trasformazione delle *droplets* in *droplet nucleii* è l'evaporazione degli strati superficiali della gocciolina. È chiaro dunque come, contrastando i fenomeni di trasformazione in vapore all'interno di un ambiente, aumentandone l'umidità relativa, si possa sostanzialmente limitare questo processo di *disseccazione*. È possibile anche che alcuni virus possano essere neutralizzati dall'evaporazione dello strato protettivo ma, una volta rientrati in un organismo e dunque in un ambiente tendenzialmente molto umido, non se ne esclude l'inversione, ovvero una re-idratazione e riattivazione virale. Un altro fattore molto importante da considerare è la resistenza del virus stesso alle condizioni climatiche piuttosto che la sopravvivenza del *droplet nucleus* che lo contiene. I Coronavirus sono caratterizzati da uno strato esterno di lipidi che risulta più stabile in condizioni di secchezza dell'aria e viene fortemente destabilizzato dalla presenza di umidità in ambiente. D'altro canto tutti quei virus che non contengono invece strati lipidici nelle loro

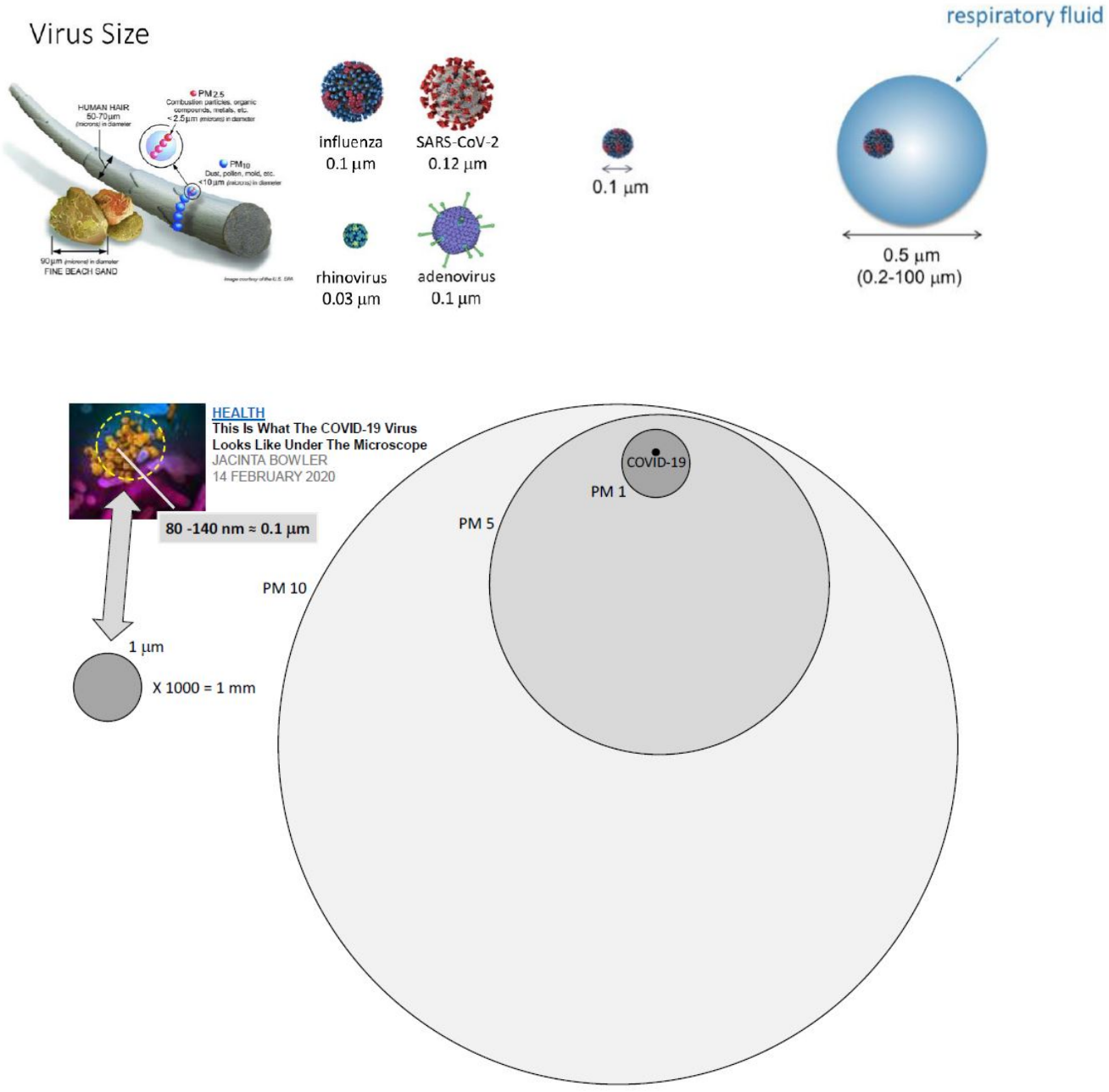



Figura 1.8: Dimensioni del virus e riferimenti. Da [8] e [6]

| Attività | Numero di *droplets* generate | Luogo di origine |
|---|---|---|
| Respirazione normale (per 5 minuti) | Da nessuna a poche | Condotto nasale |
| Forte espirazione nasale | Da poche a qualche centinaia | Condotto nasale |
| Risata (per 1 minuto) | Da nessuna a poche | Regione orofaringea |
| Contare sottovoce (da 1 a 100) | Da poche a qualche dozzina | Regione orofaringea |
| Contare a voce alta (da 1 a 100) | Da qualche dozzina a qualche centinaia | Parte frontale della bocca |
| Singolo colpo di tosse (a bocca aperta) | Da nessuna a qualche centinaia | Regione orofaringea |
| Singolo colpo di tosse (a bocca socchiusa) | Da qualche centinaia a molte migliaia | Parte frontale della bocca |
| Singolo starnuto | Da qualche centinaia di migliaia a molti milioni | Parte frontale della bocca |
| | Da poche a qualche migliaia | Dal condotto nasale e regione orofaringea |

Tabella 1.1: Numero di *droplets* generate in funzione dell'attività e la loro zona di origine. Da [5]

zone più esterne, ad esempio i *rhinovirus, enterovirus* o *adenovirus* hanno un comportamento diametralmente opposto, risultando in una maggiore persistenza alle alte umidità relative. Questo discorso può essere esteso non solo alla diffusione del virus in ambienti chiusi, sebbene questo sia il punto di maggior interesse, ma anche in rapporto alle condizioni climatiche di macro-regioni più ampie che hanno visto differenti entità di contagio. La comunità scientifica cinese ha scritto ampiamente a riguardo nelle primissime fasi della pandemia. Alcuni studi statistici [9] tracciano una forte relazione tra il parametro $R_0$ e il clima. L'ordinata in 1.10 è invece il conosciuto *effective reproductive number* il quale risulta essere un ottimo indicatore della severità dell'infezione. Lo studio in questione [9] riporta un'influenza di questi due parametri su $R_0$ di circa l'1%. Questo valore è supportato dall'approfondita analisi statistica che gli studiosi hanno effettuato nelle zone più colpite. L'ASHRAE, nel suo documento [10] ci propone un interessante punto elenco che racchiude in sè tutte le criticità legate alla presenza eccessivamente ridotta di umidità negli ambienti:

- Perdita di funzioni principali nei sistemi immunitari di pazienti vulnerabili

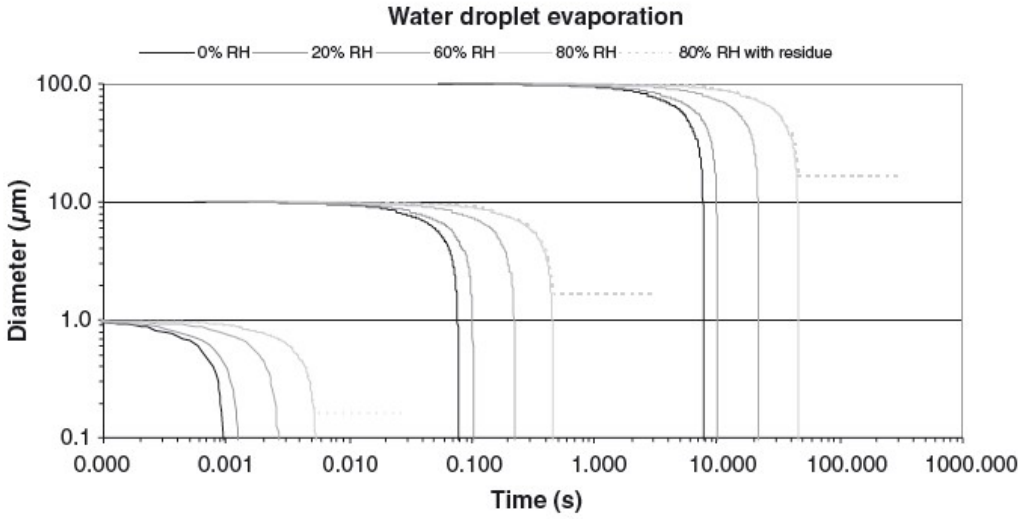
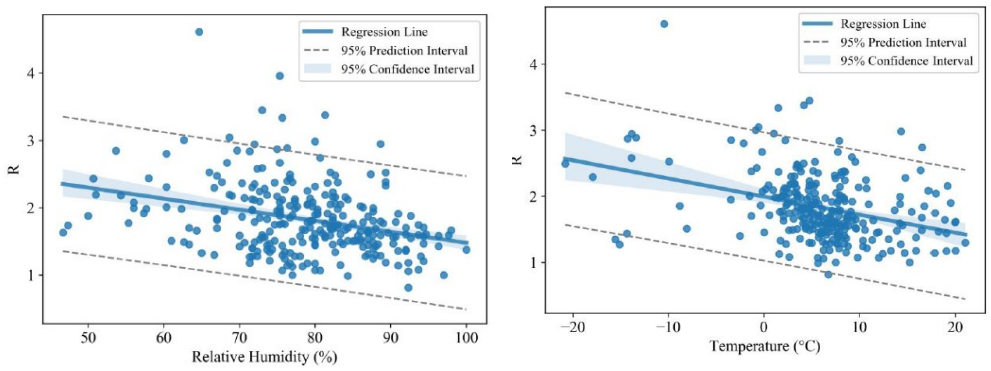



Figura 1.9: Relazione tempo di evaporazione e umidità relativa. Da [5]




(b) Effective reproduction number $R$ v.s. relative humidity

(a) Effective reproduction number $R$ v.s. temperature

Figura 1.10: Da [9]

- Permanenza più lunga delle cariche virali su superfici e strumenti
- Incremento della natura di trasmissione airborne delle malattie
- Tasso di sopravvivenza del patogeno
- Diminuzione dell'efficacia delle precauzioni di contatto e pulizia superfici
- Discomfort termoigrometrico

Se alcuni di questi punti erano già stati trattati in precedenza se ne aggiungono di nuovi estremamente interessanti. La condizione di forte secchezza dell'aria è legata

alla mancanza di un corretto funzionamento di alcune parti del sistema immunitario degli organismi. Nello specifico si fa riferimento alla funzione protettiva della pelle e dell'epitelio dell'apparato respiratorio. Questa riduzione, seppur secondaria, può risultare impattante in tutti quelli che sono soggetti suscettibili vulnerabili (dunque con presenza di malattie pregresse o ad un'età avanzata). Ultimo, ma sicuramente non per importanza, è il comfort termico. Questo verrà trattato più in dettaglio nel capitolo riguardante gli impianti di climatizzazione, ma già si vuole iniziare a trasmettere un messaggio centrale durante tutto il decorso della tesi: l'obiettivo principale di ogni impianto di asservimento è il rispetto del benessere dell'utente. Quanto trattato in questo lavoro rientra nei limiti dell'IAQ (Indoor Air Quality) e del comfort termoigrometrico (legato a temperatura e umidità). Se nell'ambito di una pandemia questi possono sembrare avere un'importanza secondaria, si vuole assolutamente confutare questa idea: il discomfort termico comporta nell'essere umano un incremento sostanziale di problematiche dell'organismo che possono risultare in un'infinità di conseguenze imprevedibili, tra cui, nondimeno, la suscettibilità a patogeni esterni e la riduzione delle difese immunitarie somatiche. D'altro canto un valore di umidità corretto apporta dei vantaggi:

- Una diminuzione nelle distanze percorse dalle *droplet nucleii*
- Un riduzione nella sopravvivenza dei patogeni sulle superfici
- Un minor tasso di trasmissione
- Una maggiore risposta del sistema immunitario:
  - riduzione nella viscosità delle membrane mucose
  - maggiore efficacia di azioni antivirali nei polmoni da parte delle ciglia
  - produzione di una qualità migliore di tosse

È dunque possibile sostenere che l'umidità ha gli effetti combinati contemporanei di ridurre la trasmissione e aumentare la combattività del sistema immunitario agli attacchi virali. Il periodo dell'anno in cui la regolazione dell'umidità risulta più importante è sicuramente l'inverno, poiché è il momento dell'anno in cui è richiesta maggiormente l'umidificazione degli ambienti per finalità di comfort ed è anche il periodo più freddo dell'anno, in cui la nascita di epidemie è maggiore (si pensi ad esempio al raffreddore comune o all'influenza stagionale). Una rappresentazione emblematica del problema è indicata in figura 1.11. Si noti come nel periodo estivo i colori di maggior tendenza siano il giallo e il verde, che, come si legge dalla legenda, sono indicativi di scarsa richiesta di umidificazione, mentre in inverno la presenza di arancione e bianco indica invece una forte necessità di umidificazione. Non si esclude che in futuro il COVID-19 possa diventare, a seguito di considerazioni fatte e ancora da fare, una malattia stagionale non meno che l'influenza e il raffreddore comune. Poiché questa relazione, come anche quella con il particolato

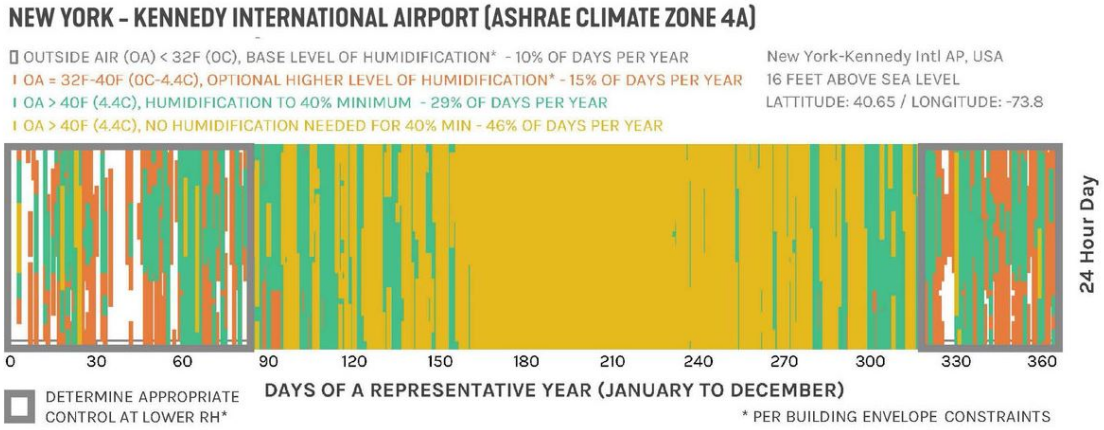



Figura 1.11: Rappresentazione grafica sintetica delle condizioni climatiche di New York come proposto da [13]

atmosferico nella prossima sezione, è al momento sotto i riflettori e la ricerca non è completa, i migliori risultati possono essere ottenuti solamente tramite estensivi rapporti statistici. Questi sono stati stilati in grandissima quantità durante le prime fasi della pandemia, soprattutto dalla comunità scientifica cinese che vanta il lusso di essere a disposizione di numerose condizioni climatiche differenti su cui poter basare un'approfondita analisi. I risultati, sebbene di grande interesse scientifico, sono ancora in fase di sviluppo e le conclusioni confermano in linea di massima quanto già detto in questo capitoletto. Si evita infine di appesantire il testo con valori numerici e grafici di contagi per zone geografiche. Infatti, le conclusioni che si possono trarre devono essere contestualizzate nell'ambito dell'umidificazione per interni, ambito principale di questo scritto.

### 1.3.4 Relazione col particolato atmosferico

Un'altra interessante correlazione può essere stretta fra il trasporto di *droplets* di bioaerosol infetto e la presenza di particolato atmosferico e polveri sottili in ambiente. Questo si compone principalmente di una miscela di prodotti solidi sospesi nell'aria che possono avere dimensioni variabili da pochi nanometri a centinaia di micrometri. Le particelle possono essere di varia natura: viene definito particolato primario quello direttamente emesso dalle sorgenti e secondario il risultato di complesse reazioni chimiche e processi fisici di lavorazione. L'origine è in ogni caso antropica e le cause possono essere molteplici: ad esempio gli impianti di riscaldamento (anche domestico e specie quelli basati sulla combustione di biomassa), trasporti su strada, attività industriale, ... Poiché i composti possono essere molto eterogenei, questo viene classificato in base alle dimensioni delle particelle che lo

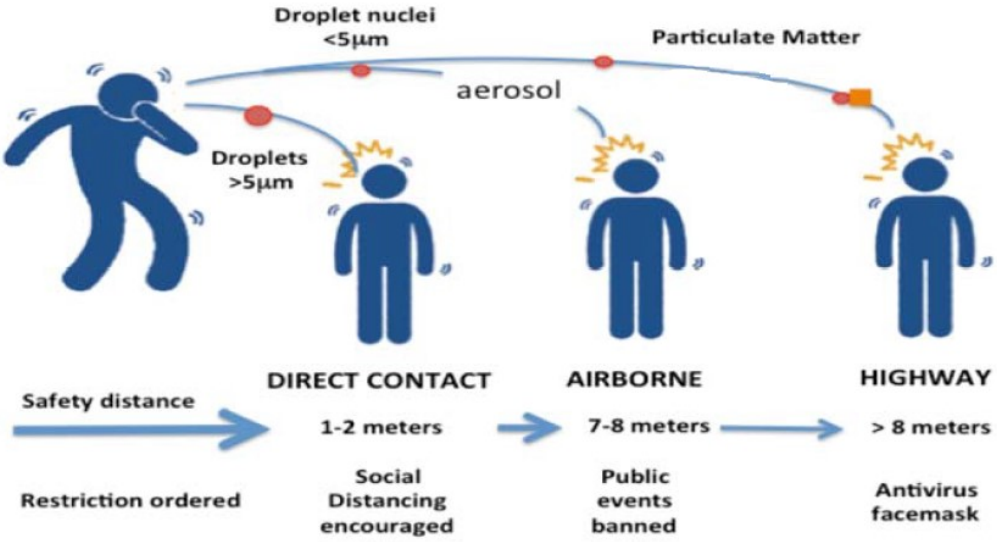
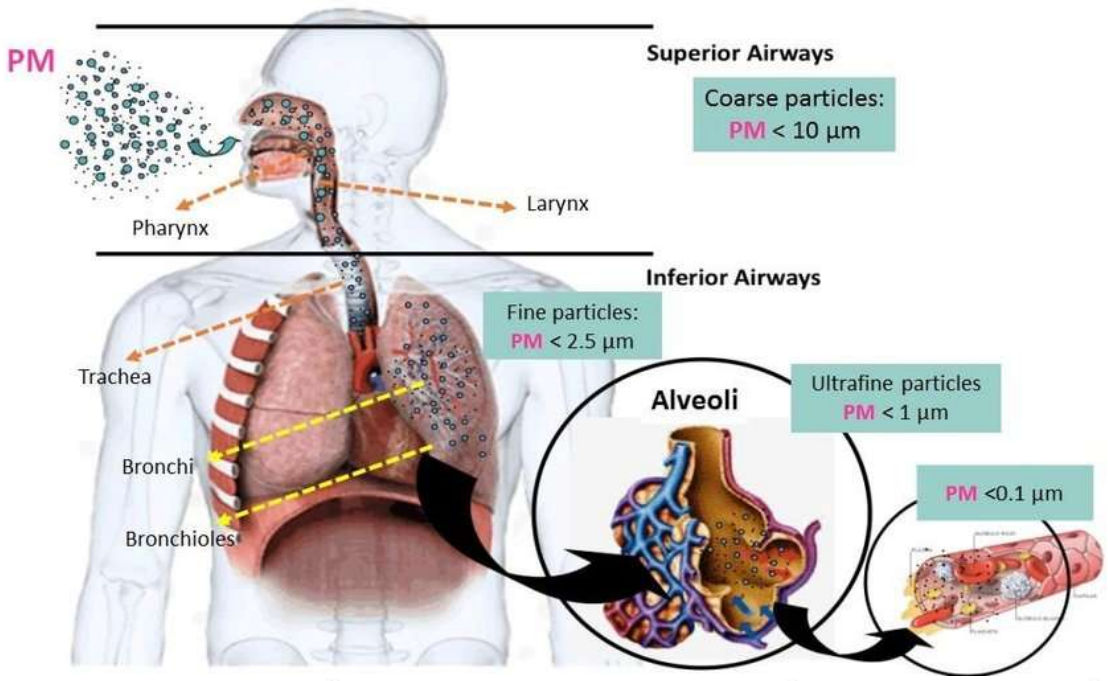



Figura 1.12: Trasmissione airborne per mezzo di particolato atmosferico. Da [15]

compongono. Nascono dunque le nomenclature `PM10`, `PM2.5` e, seppur meno utilizzato, `PM1`, dove il numero nel nome indica il massimo diametro in $\mu m$. È chiaro che la prima delle tre categorie contiene anche i dati rispettivi alle seconde due. Alcuni dei composti più comuni nel particolato atmosferico sono l'anidride solforosa ($SO_2$), il monossido di carbonio ($CO$), il diossido d'azoto ($NO_2$), l'ozono ($O_3$) e altri.
La questione nasce dal fatto che alcuni eventi di contagio non riescono ad essere spiegati solo tramite modello con *droplets* airborne, nello specifico forti anomalie e discontinuità tra regioni diverse. Ad esempio nella zona di Milano, nel pieno dello sviluppo della pandemia si aveva un $R_0$ intorno a 6. Tale valore è prossimo ai peggiori mai registrati in Cina. La risposta è stata trovata nella differente concentrazione di inquinamento atmosferico tra le zone e la comunità scientifica si è inizialmente interessata alla relazione che intercorre tra diffusione del contagio e valori ambientali. Una possibile ipotesi, rappresentata in figura 1.12 sostiene che il particolato stesso possa essere un veicolo di trasporto del patogeno. Sebbene sia una modalità di trasmissione di natura fortemente secondaria ciò potrebbe spiegare tale differenza. Il processo secondo il quale le cariche virali possono aderire alle particelle solide sospese è quello di *adsorbimento* (per mezzo di coagulazione). In seguito queste possono essere rilasciate per mezzo della diffusione, dopo un certo periodo di tempo, ad una certa distanza che secondo alcuni studi (ad es. [15]) può superare gli $8m$. Questa ipotesi è confermata anche da studi passati (ad esempio la diffusione di influenza per mezzo della polvere di origine sabbiosa nel deserto del Sahara).




| Diameter (µm) | Penetration Level | Classification |
|---|---|---|
| > 7 | Oral and Nasal Cavities | Inhalable |
| 4.7 – 7 | Larynx | |
| 3.3 – 4.7 | Trachea and Bronchi | Thoragics |
| 2.1 – 3.3 | Secondary Bronchioles | |
| 1.1 – 2.1 | Bronchioles | Breathable |
| 0.65 – 1.1 | Alveoli | |

Figura 1.13: Gravità del particolato per dimensione. Da [6]

Una seconda ipotesi più importante è invece la relazione che intercorre con la salute dell'apparato respiratorio e delle difese immunitarie della popolazione. Seguono alcune considerazioni:

- Soggetti suscettibili alla malattia, che hanno vissuto a lungo in zone ad alto tasso di inquinamento possono verosimilmente aver sviluppato nel tempo malattie pregresse che amplificano l'effetto del COVID-19, aumentando di conseguenza l'emissione di cariche virali (tosse, starnuti e altri eventi respiratori acuti) e dunque la trasmissione per altre modalità.

- Elevate concentrazioni di particolato compromettono il funzionamento di alcuni meccanismi di difesa del sistema immunitario e riducono dunque la combattività messa in atto dall'organismo

- La possibilità che il SARS-CoV-2 possa effettivamente essere trasportato dalle particelle sospese lo rende ancora più pericoloso, in quanto molte di queste riescono a penetrare fino alle basse vie respiratorie. La malattia risulterebbe dunque estremamente aggravata dal trasporto di patogeno direttamente nel luogo di massima proliferazione

- Come già espresso in precedenza un enorme effetto sul corretto funzionamento del sistema immunitario e del nostro organismo in generale è dato dal livello di discomfort. È plausibile che l'inquinamento possa costituire un fattore di stress cronico nella popolazione soggetta, con anche conseguenze dirette sui livelli di contagio.

In ogni caso, la presenza conclamata di particelle caratterizzate da un $d \leq 4\mu m$ rappresenta da sola un forte rischio di contrarre malattie respiratorie croniche e contribuirebbe dunque a dare un significativo *"boost"* alla diffusione del contagio.
La presenza di particolato in sè è molto rappresentativa dello stato in cui versa la regione in analisi. Difatti è plausibile che le zone ad alto inquinamento atmosferico siano in paesi in via di sviluppo (ad esempio India o Cina) oppure regioni ad alta densità di popolazione, elevata attività produttiva di natura antropica e antropogenica o intensivo utilizzo di mezzi di trasporto (su strada o rotaia). Di per sè, queste poche caratteristiche delineano degli ambienti estremamente propensi alla diffusione di epidemie come quelle da SARS-CoV-2. Come anche già espresso nel capitolo precedente, alla luce di una ricerca ancora poco approfondita, gli studi che possono essere presentati a riguardo sono unicamente di natura statistica. Questi sono sottoposti a rumore di varia origine. Diverse fonti (tra cui anche quelle inserite in bibliografia) analizzano gli andamenti paralleli di contagi e presenza di particolato. I risultati riportati sono ancora contraddittori e la relazione non è del tutto evidente. L'unico punto su cui molti studi concordano è la coincidenza di picchi di contagio con picchi di particolato in ambiente. La sovrapposizione di questi valori anomali è ancora in fase di studio e potrebbe indicare o meno la presenza reale di un collegamento.

### 1.3.5 Effetti della radiazione elettromagnetica

Questa piccola sottosezione riguarda l'effetto della radiazione elettromagnetica sulla sopravvivenza delle cariche virali in ambiente, siano esse depositate su superfici o in sospensione aerea per mezzo di aerosol. È ormai noto che l'emissione di energia radiante nello spettro dell'ultravioletto ha la capacità di inattivare batteri, funghi e virus, interagendo con il DNA e l'RNA virale dell'agente patogeno. Ciò ne compromette seriamente le capacità riproduttive e li rende di fatto innocui. Quando l'applicazione versa sulla funzione germicida tale energia prende il nome di `GUV`(Germicidal Ultra Violet) o `UVGI` (Ultra Violet Germicidal Irradiation). La banda dell'ultravioletto è molto estesa: la porzione di questa che ha il maggior effetto è quella definita `UV-C` che intercorre tra le lunghezze d'onda di 200 e 280$nm$, dove $\lambda = 265nm$ apporta i migliori risultati. L'effetto di inattivazione virale è

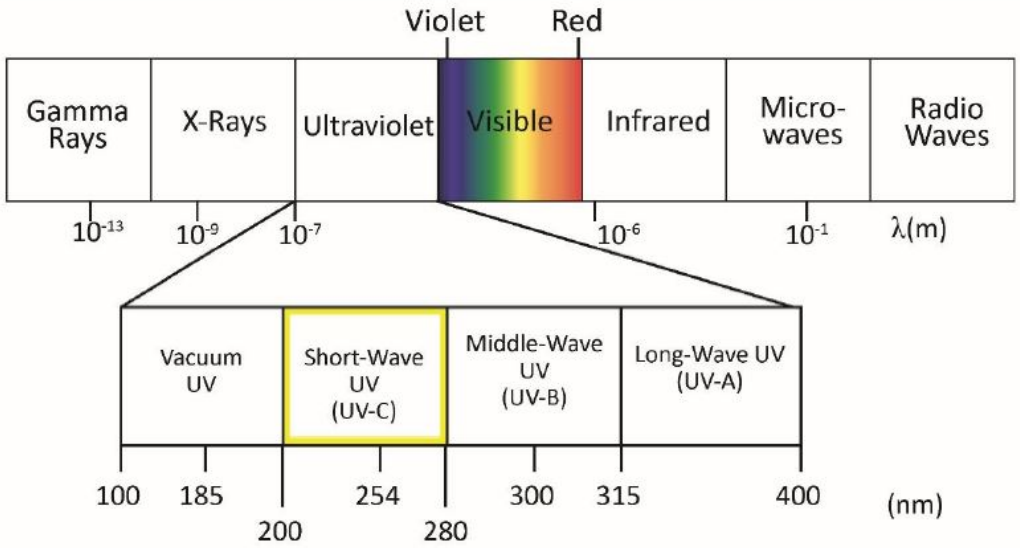



Figura 1.14: La porizione di banda ultravioletta col maggior effetto germicida. Da [19]

perfettamente funzionante anche sul SARS-CoV-2. Nei prossimi capitoli si parlerà brevemente di filtrazione per mezzo di lampade UV e verranno ripresi in maniera più dettagliata i concetti qua espressi (sezione 2.4.5).
Una delle conseguenze più immediate di questo processo di disinfezione è che per ogni modello di calcolo e analisi di rischio di contagio, nonché per la totalità dei protocolli di sicurezza emessi dagli enti, **l'aria esterna è del tutto priva di carica virale attiva**. Non solo la teoria della diluizione perfetta di patogeno fa sì che il volume di calcolo tenda all'infinito (e dunque la concentrazione sia nulla), ma l'azione importante della radiazione solare (che consta anche delle lunghezze d'onda prima elencate) permette di considerare *inattivato* ogni virus in essa presente.

## 1.4 La controversia sul SARS-CoV-2

La trasmissione di tipologia airborne, per mezzo di bioaerosol infetto, è stata nei primi tempi dello studio della pandemia al centro di forti discussioni. Il `27 Marzo 2020` l'OMS si dichiara apertamente contro tutte quelle teorie che validino questa modalità e l'immagine 1.15 è stata postata sui social network il giorno successivo. La comunità scientifica è divisa e gli articoli pubblicati presentano continuamente nuove prove a favore o contrarie. Tutt'oggi il dibattito non si è assestato da un lato o dall'altro, ma anche l'OMS ha rivisitato ed *"addolcito"* la sua posizione a riguardo [21].
Questo lavoro nasce dal rapporto stretto che intercorre tra la trasmissione airborne e l'utilizzo e manutenzione corretta degli impianti di ventilazione. Nonostante ciò, si può dimostrare che anche in assenza di questa modalità di contagio, il ruolo che la distribuzione del moto dell'aria gioca sul valore di $R_0$ non è nullo. Di conseguenza si riportano in maniera più oggettiva possibile le posizioni contrarie e favorevoli, sebbene si studierà più nello specifico il caso che avvalora questa ipotesi, poiché impone più limitazioni e controlli. Secondo chi scrive, qualora la possibilità di poter venire infettati tramite bioaerosol non sia nulla, questa deve essere presa in considerazione e studiata approfonditamente prima di poter giudicarne la serietà. Non si vuole sfociare nel sensazionalistico, nè però sottovalutare una possibile minaccia. Si spera dunque che i risparmi in senso di lavoro, manodopera e denaro che possono essere ottenuti dal trascurare questa discussione non soprassiedano alle possibili tragiche conseguenze. Come si può leggere in alcuni articoli scientifici [22,23] la determinazione della componente airborne di un'epidemia è fortemente problematica, soprattutto nel caso in cui questa modalità avvenga anche con concentrazioni ridotte (come nel caso del Sars-CoV-2). Allo stesso tempo, trascurarla (oppure dilungare troppo gli studi teorici) potrebbe avere un costo in vite umane. Gli autori di [22] suddividono questa modalità in tre diverse categorie: obbligata (o unica), preferenziale (o primaria) e opportunistica (o secondaria), ordinate in senso decrescente di probabilità di viabilità. Alla luce degli studi effettuati non si hanno dubbi che la trasmissione airborne del SARS-CoV-2 sia tipologia *opportunistica*, ovvero che le vie principali sono altre (come si legge in 1.2). Nonostante ciò, il rischio esisterebbe e non sarebbe nullo.

### 1.4.1 L'Infodemia da COVID-19: il COVID non è airborne

Nei suoi scritti pubblicati, l'OMS utilizza il termine ***Infodemic***, o in italiano *Infodemia*. Con questo si vuole indicare la diffusione sistematica da parte di soggetti, più o meno malintenzionati, di false notizie e informazioni. A tutti gli effetti questa può essere considerata grave al pari della stessa pandemia in quanto ha la possibilità di scatenare panico o minare la validità di altre notizie invece confermate dalla

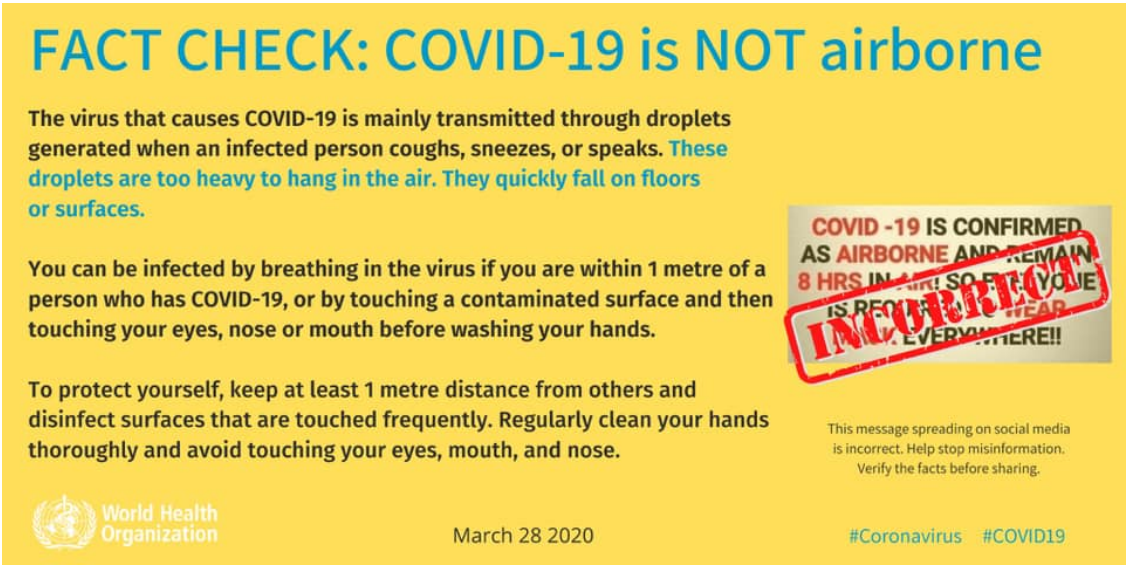



Figura 1.15: Comunicato dell'OMS su *Facebook* del `28/03/2020`

comunità scientifica. Nei primi mesi della crisi da COVID-19, la trasmissione airborne tramite bioaerosol era stata categorizzata tra queste false notizie. Il punto di forza della loro posizione stava nell'assenza di studi comprovati. Come già detto in precedenza la dimostrazione dell'effettiva presenza di modalità airborne è estremamente complicata e non mancano certamente studi che dimostrano l'assenza di una quantità pericolosa di RNA virale nelle *droplets* [3]. Altro punto a favore sta nelle eccessive approssimazioni che devono essere fatte allo scopo di validare una reale minaccia airborne (ad es. un nebulizzatore ad alta potenza non potrà mai riflettere le vere condizioni di tosse o starnuti, nè tanto meno le procedure cliniche [21]) e che quindi minerebbero ulteriormente il valore scientifico di tali scritti. Infine la riduzione di infettività nelle *droplets nucleii* del virus è comprovata. Alcune posizioni sostengono sia tale da rendere innocuo il patogeno. È dunque comprensibile come inizialmente la diffusione della notizia potesse presentare un pericolo di panico nella popolazione, anche maggiore rispetto al vero e proprio contagio. Nonostante le dure posizioni della OMS, che scrive in un documento pubblicato nella seconda metà di `Febbraio 2020`, che in 75.000 di COVID-19 in Cina non è stato segnalato alcun contagio tramite bioaerosol, non viene esclusa la possibilità che in alcune specifiche situazioni, che esulano dalle problematiche diffuse sulla popolazione, questa non sia trascurabile. Nello specifico nel suo documento [24] fa riferimento ad *alcune procedure specifiche condotte in strutture sanitarie e definite "aerosol-generating"*. Queste sono ad esempio:

- intubazione tracheale
- ventilazione forzata non invasiva

- tracheotomia
- rianimazione cardiopolmonare
- ventilazione manuale prima di intubazione
- broncoscopia

ovvero interventi tenuti in situazioni particolari e specie nel caso di trattamento in terapia intensiva (IPC), per cui l'OMS non ha negato la necessità di precauzioni speciali [25].

### 1.4.2 L'anello mancante: il COVID è airborne

Lo studio della validità della modalità di trasporto airborne tramite bioaerosol infetto è ancora in corso. In questa sezione si vanno ad analizzare alcuni dei punti che sosterrebbero maggiormente la sua importanza nei contagi. Si vuole innanzitutto sottolineare che sebbene si stiano presentando entrambe le parti in causa, la questione è del tutto aperta e gli articoli che avvalorano questa ipotesi semplicemente non sono ancora riusciti a dimostrarla scientificamente e unanimemente. Allorché sia presentato un documento che univocamente ne garantisca la veridicità o meno, la comunità scientifica non può fare altro che adattarvisi, sebbene si sappia come la disinformazione dilaghi ciononostante incontrastatamente.
Per iniziare è possibile effettuare un paragone tra SARS-CoV-2 e SARS-CoV-1. Sebbene con le difficoltà già spiegate è stato possibile dimostrare che il secondo ha una natura di tipologia airborne. Qualora si volesse ragionare puramente per similitudine non si dovrebbe in ogni caso escludere sistematicamente la possibilità. Sono stati inoltre presentati casi in cui mancava un anello di collegamento diretto tra persone suscettibili e infetti in ambienti chiusi. Un esempio portante è la nave da crociera Diamond Princess (già nominata nel capitolo 1.2), dove il valore di $R_0$ è arrivato fin quasi a 11, nonostante le precauzioni messe in atto dal capitano dell'imbarcazione tra cui auto isolamento nella propria cabina, contatto diretto estremamente ridotto e igiene delle mani meticolosamente rispettata. La domanda che può essere posta è dunque come si è diffuso il contagio e la risposta può includere la canalizzazione di *droplets* leggere infette nei condotti di ventilazione e negli stretti impianti di climatizzazione che risiedono a bordo di una nave. Sono numerosi i casi che la letteratura riporta di contagi "anomali", che non possono essere spiegati tramite le modalità di trasmissione "classiche". Uno degli scritti che presenta più argomenti e dati materiali [28] dichiara che il trasporto di patogeni attivi è plausibile poiché il virus rimane attivo in un bioaerosol sospeso per circa tre ore (e sulle superfici fino anche a giorni interi). Viene anche confutata la tesi che l'infettività è troppo ridotta per poter causar danno indicando come, diversamente dal SARS-CoV-1, la carica virale concentrata nelle alte vie respiratorie è sostanzialmente maggiore.

Alla luce di queste considerazioni alcuni ospedali hanno iniziato a misurare le concentrazioni di RNA virale nelle zone ad alto tasso di presenza di malati da COVID-19. I risultati sono effettivamente molto eterogenei, ma nella maggioranza dei casi una quantità notevole di patogeno è stato trovato in ambiente. Ci si rifà ai vari articoli in bibliografia [26,27,29] per una serie di studi specifici e di valori numerici.

### 1.4.3 Riepilogo

| Il SARS-CoV-2 non è airborne | Il SARS-CoV-2 è airborne |
|---|---|
| • Mancanza di dati significativi che avvalorano la modalità di trasmissione | • Difficoltà nel reperimento di dati significativi e costo in vite |
| • Rischio reale solo in situazioni specifiche (*aerosol-generating procedures*) | • Presenza di rischio in ogni ambiente indoor (*Diamond Princess Cruise Ship*) |
| • Ridotta infettività del patogeno sospeso nel bioaerosol | • Forte presenza di carica virale nelle alte vie respiratorie |
| • Rischio di *infodemia* e panico nella popolazione | • Necessità di informare e educare alla prevenzione |
| • Nuovo patogeno: nessuno è esperto e ancora si conosce poco | • Confronto con malattie simili passate ampiamente studiate |
| • Sopravvivenza in aria del patogeno controllata in ambienti sanitari | • Necessità di interventi diffusi atti alla riduzione della sopravvivenza in aria del patogeno |
| • I contagi sono sempre spiegabili tramite altre modalità di trasmissione | • Presenza di contagi "anomali" e anelli di trasmissione mancanti |

Tabella 1.2: Tabella riepilogativa delle posizioni riguardo la componente airborne del SARS-CoV-2

# Capitolo 2

# I protocolli di manutenzione degli impianti di climatizzazione

## 2.1 La pandemia da SARS-CoV-2

### 2.1.1 La situazione italiana

Allo scopo di contrastare e contenere il diffondersi del virus COVID-19 nella regione Lombardia e nelle province di Modena, Parma, Piacenza, Reggio nell'Emilia, Rimini, Pesaro e Urbino, Alessandria, Asti, Novara, Verbano-Cusio-Ossola, Vercelli, Padova, Treviso e Venezia, sono adottate le seguenti misure:
a) evitare ogni spostamento delle persone fisiche in entrata e in uscita dai territori di cui al presente articolo, nonché all'interno dei medesimi territori, salvo che per gli spostamenti motivati da comprovate esigenze lavorative o situazioni di necessita' ovvero spostamenti per motivi di salute. E' consentito il rientro presso il proprio domicilio, abitazione o residenza; [...]
g) sono sospese tutte le manifestazioni organizzate, nonche' gli eventi in luogo pubblico o privato, ivi compresi quelli di carattere culturale, ludico, sportivo, religioso e fieristico, anche se svolti in luoghi chiusi ma aperti al pubblico, quali, a titolo d'esempio, grandi eventi, cinema, teatri, pub, scuole di ballo, sale giochi, sale scommesse e sale bingo, discoteche e locali assimilati; nei predetti luoghi è sospesa ogni attività; [...]
s) sono sospese le attivita' di palestre, centri sportivi, piscine, centri natatori, centri benessere, centri termali (fatta eccezione per l'erogazione delle prestazioni rientranti nei livelli essenziali di assistenza), centri culturali, centri sociali, centri ricreativi;

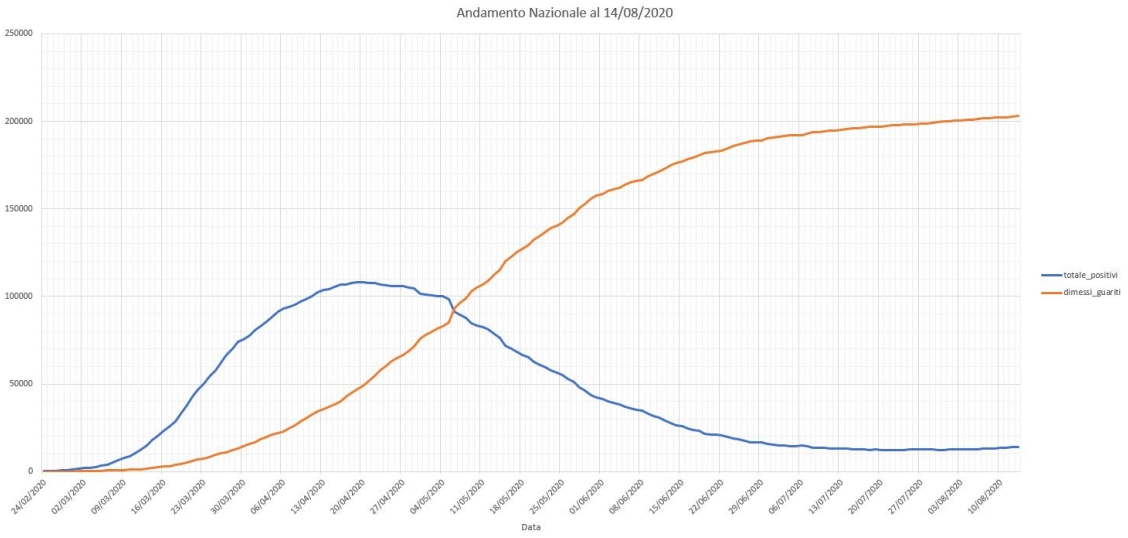
estratto dall'art.1 del DPCM dell'8 Marzo 2020

Il 9 Marzo 2020 il presidente del consiglio dei Ministri, Giuseppe Conte, firma il decreto ministeriale che estende le misure del DPCM del giorno precedente (da cui l'estratto qui sopra) all'intero territorio nazionale italiano. Vengono inoltre vietate ogni forma di assembramento di persone in luoghi privati e pubblici. Prendendo effetto tale decreto a partire dalla giornata successiva, il 10 Marzo 2020 inizia in Italia ufficialmente il periodo di *lockdown*. Vengono chiuse l'11 Marzo anche la totalità delle attività commerciali di vendita al dettaglio con l'eccezione di negozi di generi alimentari, di prima necessità, delle farmacie e parafarmacie. Il 20 Marzo 2020 vengono interdetti alla popolazione, tramite l'emanazione di un'ordinanza, parchi, ville, aree gioco, giardini pubblici e spazi verdi di ogni genere e viene proibito lo svolgersi di attività ludica all'esterno. Il 22 Marzo 2020 è vietato lo spostamento tra comuni, con eccezione di comprovate esigenze lavorative o assolute emergenze sanitarie. Il termine viene inizialmente fissato al 3 Aprile 2020, prima posticipato al 13 Aprile 2020 e poi al 3 Maggio 2020. Dal giorno successivo, 4 Maggio 2020, inizia la *fase 2*, con conseguente graduale riapertura delle attività produttive e commerciali.

Tutte le informazioni contenute da questo punto fino alla sezione 2.2 sono da considerarsi valide alla **data di stesura** di questa parte di tesi, compresa tra **Agosto** e **Settembre 2020**

La figura e 2.1 è rappresentativa dell'andamento dei casi di COVID-19 in Italia. Complessivamente, la situazione indica il superamento del picco di infezioni che può essere inquadrato nell'ultima settimana di Aprile 2020. Non ci sono dubbi riguardo l'efficacia delle misure di *lockdown* varate dal governo italiano. Queste hanno permesso di controllare in maniera efficace la pandemia, seppur con risultati differenti a seconda delle regioni. Nonostante ciò, si consiglia sempre di tenere la guardia alta per l'eventuale nascita di nuovi focolai che segnalano ancora una situazione epidemiologica non estinta. Viene suggerito il rigoroso rispetto delle normative vigenti, nonché le precauzioni di cui alla sezione seguente. Nel rapporto [30], valido per la settimana tra il 4-10 Maggio 2020, ovvero quella immediatamente successiva all'inizio della *fase 2*, viene inoltre indicata la necessità di rafforzamento dei servizi territoriali locali. Non si escludono infatti recrudescenze epidemiche che renderebbero dunque necessario un intervento di miglioramento della riposta a livello nazionale. Successivamente, vengono pubblicati a cadenza settimanale dei rapporti da parte del Ministero della Salute che racchiudono i dati relativi al periodo in analisi e il riepilogo di alcuni punti di ragionamento. In questi vengono in ogni caso ripetuti alcuni concetti già espressi e sviluppati di nuovi:

- A seguito del periodo di *lockdown* l'andamento dei nuovi casi presenta bassa criticità. Vengono segnalate settimanalmente **lievi diminuzioni** o aumenti, ma la situazione generale rimane sostanzialmente stabile




13 agosto 2020 - Aggiornamento casi Covid-19

Dati aggregati quotidiani Regioni/PPAA - Ministero della Salute - Istituto Superiore di Sanità

| REGIONE | POSITIVI SARS-CoV2 | | | | DIMESSI GUARITI | Deceduti | Casi totali | Incremento casi totali (rispetto al giorno precedente) | Casi identificati dal sospetto diagnostico | Casi identificati da attività di screening | CASI TOTALI | Totale casi testati | Totale tamponi effettuati | INCREMENTO TAMPONI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ricoverati con sintomi | Terapia intensiva | Isolamento domiciliare | Totale attualmente positivi | | | | | | | | | | |
| Lombardia | 170 | 11 | 5.358 | 5.539 | 74.754 | 16.835 | 97.128 | 74 | 90.188 | 6.940 | 97.128 | 833.060 | 1.394.380 | 7.174 |
| Piemonte | 77 | 3 | 784 | 864 | 26.979 | 4.139 | 31.982 | 26 | 24.807 | 7.175 | 31.982 | 322.956 | 530.384 | 2.796 |
| Emilia-Romagna | 79 | 4 | 1.744 | 1.827 | 24.132 | 4.298 | 30.257 | 37 | 28.581 | 1.676 | 30.257 | 449.766 | 752.657 | 7.168 |
| Veneto | 30 | 6 | 1.349 | 1.385 | 17.406 | 2.094 | 20.885 | 84 | 19.612 | 1.273 | 20.885 | 518.924 | 1.342.714 | 10.065 |
| Toscana | 13 | 3 | 574 | 590 | 9.008 | 1.137 | 10.735 | 28 | 10.407 | 328 | 10.735 | 302.546 | 460.694 | 3.128 |
| Liguria | 20 | 2 | 235 | 257 | 8.567 | 1.569 | 10.393 | 63 | 8.542 | 1.851 | 10.393 | 110.755 | 206.804 | 1.704 |
| Lazio | 195 | 9 | 923 | 1.127 | 6.960 | 869 | 8.956 | 36 | 6.290 | 2.666 | 8.956 | 367.897 | 449.886 | 2.211 |
| Marche | 8 | 0 | 161 | 169 | 5.831 | 987 | 6.987 | 11 | 6.987 | 0 | 6.987 | 107.237 | 180.090 | 1.302 |
| Campania | 38 | 2 | 407 | 447 | 4.283 | 440 | 5.170 | 27 | 5.082 | 88 | 5.170 | 186.543 | 354.546 | 1.708 |
| P.A. Trento | 1 | 1 | 61 | 63 | 4.532 | 405 | 5.000 | 2 | 3.401 | 1.599 | 5.000 | 76.012 | 166.427 | 1.425 |
| Puglia | 46 | 2 | 228 | 276 | 3.979 | 554 | 4.809 | 16 | 1.838 | 2.971 | 4.809 | 182.067 | 262.847 | 1.746 |
| Sicilia | 42 | 6 | 556 | 604 | 2.757 | 284 | 3.645 | 42 | 2.956 | 689 | 3.645 | 234.950 | 303.687 | 2.046 |
| Abruzzo | 24 | 1 | 209 | 234 | 2.826 | 472 | 3.532 | 16 | 3.174 | 358 | 3.532 | 89.847 | 138.681 | 905 |
| Friuli Venezia Giulia | 7 | 3 | 166 | 176 | 2.952 | 348 | 3.476 | 15 | 3.434 | 42 | 3.476 | 133.284 | 277.160 | 2.517 |
| P.A. Bolzano | 7 | 1 | 114 | 122 | 2.367 | 292 | 2.781 | 3 | 2.781 | 0 | 2.781 | 61.905 | 118.412 | 1.590 |
| Umbria | 10 | 0 | 52 | 62 | 1.382 | 80 | 1.524 | 7 | 1.464 | 60 | 1.524 | 83.046 | 131.041 | 796 |
| Sardegna | 8 | 0 | 90 | 98 | 1.247 | 134 | 1.479 | 17 | 1.379 | 100 | 1.479 | 98.236 | 116.177 | 1.159 |
| Calabria | 8 | 1 | 110 | 119 | 1.100 | 97 | 1.316 | 12 | 1.159 | 157 | 1.316 | 129.359 | 131.392 | 1.164 |
| Valle d'Aosta | 3 | 0 | 11 | 14 | 1.057 | 146 | 1.217 | 0 | 1.099 | 118 | 1.217 | 16.397 | 22.938 | 99 |
| Molise | 0 | 0 | 35 | 35 | 427 | 23 | 485 | 6 | 475 | 10 | 485 | 28.421 | 29.599 | 156 |
| Basilicata | 0 | 0 | 73 | 73 | 377 | 28 | 478 | 1 | 402 | 76 | 478 | 49.448 | 50.248 | 329 |
| TOTALE | 786 | 55 | 13.240 | 14.081 | 202.923 | 35.231 | 252.235 | 523 | 224.058 | 28.177 | 252.235 | 4.382.656 | 7.420.764 | 51.188 |

Figura 2.1: Andamento nazionale italiano al `14 Agosto 2020`

- In ogni rapporto è indicato l'incidenza cumulativa negli ultimi 14gg. Questo risulta per ogni settimana sempre minore di 10 casi ogni 100.000 persone.

- Viene riportata una stima del valore di $R_t$. Questo si differenzia da $R_0$ per il fatto di descrivere il tasso di contagiosità dopo l'applicazione di misure atte al contenimento dell'epidemia. Tale parametro è minore dell'unità su tutto il territorio nazionale, sebbene sia ancora soggetto a fluttuazioni per la sua estrema sensibilità alla nascita di focolai diffusi in alcune regioni. Nei suoi valori più conservativi $R_t > 1$.

- Persiste l'assenza di segnali che evidenziano il sovraccarico dei sistemi di assistenza sanitaria sul territorio nazionale. Durante il picco di pandemia erano

stati invece registrati forti disagi per l'eccessiva affluenza di pazienti negli ospedali.

- Si evidenzia che l'epidemia di SARS-CoV-2 **non è conclusa** e si invita sempre a mantenere alta la guardia e a rispettare le normative vigenti. Negli ultimi periodi, a seguito di analisi a tappeto più avanzate, sono segnalati anche il numero di focolai attivi e nuovi sul territorio nazionale. La situazione prevede in ogni caso un forte rischio di peggioramento

- Si invita a rafforzare l'attività di *testing-tracing-tracking*. Le parole derivano dall'inglese e significano *testare-tracciare-rintracciare* (le ultime due sono termini molto simili). Ciò indica la procedura di testare un paziente e ripercorrere le sue attività nei 14 giorni precedenti al risultato di positività per evidenziare eventuali comportamenti che possono dar luogo a contagi secondari. Un buon controllo permette di interrompere catene di contagio sul nascere e portare assistenza clinica alle persone infettate in maniera più tempestiva

- Si sottolinea l'importanza di mantenere alta la consapevolezza della popolazione sullo stato "fluido" della situazione epidemiologica. Negli ultimi periodi viene segnalato l'aumento di casi importati da altre regioni o da stati esteri e si sottolinea l'importanza dei provvedimenti quarantenari e del *"contact tracing"*.

- Si osserva una diminuzione dei casi di COVID-19 che richiedono ospedalizzazione e un abbassamento dell'età mediana di contagio (intorno ai 40 anni). Questo è a seguito di un coinvolgimento sempre minore di persone anziane nei luoghi e attività che risultano specialmente favorevoli allo sviluppo di focolai (assembramenti in ristoranti, bar, discoteche, ...).

Il documento analizzato nel punto elenco è stilato nell'estate del `2020` ed è chiaro come si conformi alla situazione pandemica di allora. Nell'autunno dello stesso anno si è già invece in presenza di una nuova importante recrudescenza epidemiologica (seconda ondata) e del rischio di un nuovo *lockdown*.

### 2.1.2 La situazione nel mondo

L'Italia è risultato uno dei paesi più colpiti nel mondo e sicuramente nel continente Europeo in `Marzo` e `Aprile`. A distanza di alcuni mesi però ogni paese sul pianeta ha dovuto affrontare la crisi, se *in primis* di natura epidemiologica, successivamente di origine invece economico-sociale.
Il tasso di mortalità è risultato estremamente variabile a seconda del tasso di contagio e delle possibilità delle nazioni a internare i pazienti in condizioni critiche. Inoltre, la prontezza dei governi a una risposta efficace ha fortemente impattato sulle condizioni in cui diversi paesi versano, e alle volte questa immediatezza nell'agire ha evitato il superamento della soglia critica al di là della quale i sistemi

sanitari tendono al collasso. Quelle nazioni che sono riuscite, tramite le indicazioni dell'OMS, a ridurre la trasmissione hanno mantenuto al minimo il numero di focolai attivi e contagi secondari, nonché fornito supporto sanitario di alta qualità.
Laddove ciò non sia stato possibile, come purtroppo in Italia, si sono avuti periodi di *lockdown* o *shutdown*, come già definiti al paragrafo precedente. Ciò ha comportato, oltre a gravi disagi di natura economica, anche un impatto negativo sulle comunità, sugli individui e sulla popolazione in generale, con maggiore forza qualora la situazione fosse già critica in precedenza (zone di povertà, fenomeno dei migranti, ...). In questi casi, ovvero dove sono presenti abitazioni e luoghi sovraffollati e dove le persone fanno affidamento solo su sostentamenti economici quotidiani, il COVID-19 ha portato la più grande rovina, sia dal punto finanziario, sia morale. La figura 2.2 riporta la situazione al `31 Marzo 2020`, quindi durante il

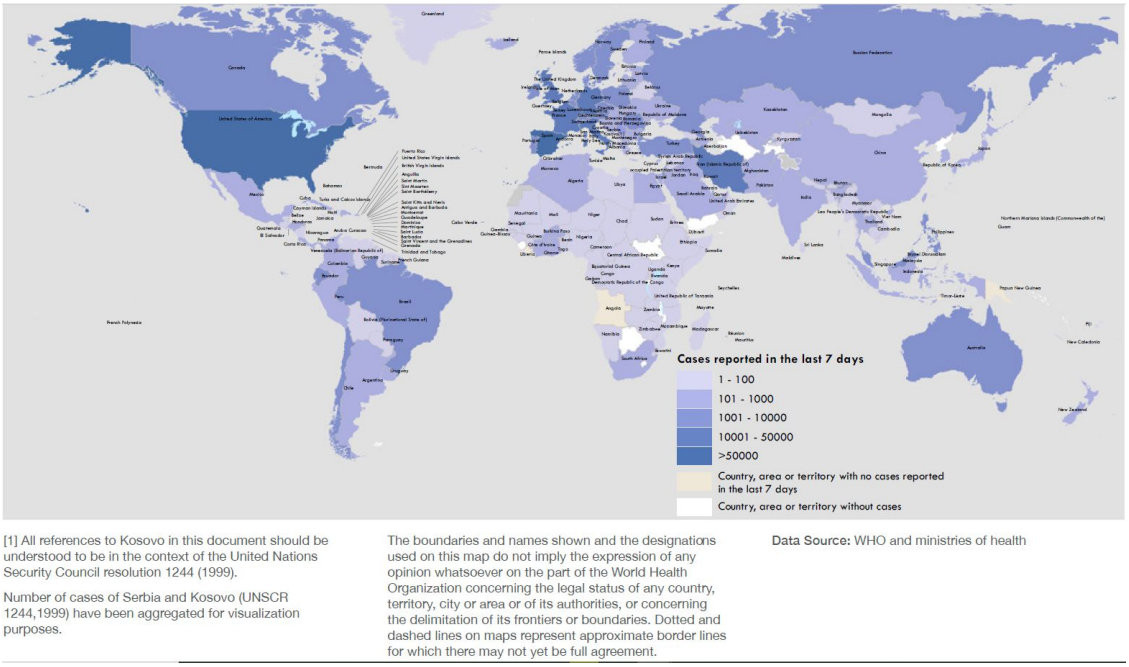



Figura 2.2: Paesi, nazioni e territori con casi conclamati di COVID-19 negli ultimi 7 giorni al `31 Marzo 2020`

peggior periodo in Italia. Sebbene i valori numerici e i paesi con casi conclamati siano mutati ad oggi (durante l'estate il nuovo epicentro della pandemia sono state le Americhe, che ritenevano più della metà dei casi a livello globale), si può sempre notare come il problema sia effettivamente di portata mondiale e come nessuna nazione ne sia esclusa. Ad ognuno è richiesta la propria parte nel contesto della diminuzione della trasmissione e i propri sacrifici, specie laddove le condizioni per affrontare una pandemia non siano a tutti gli effetti raggiunte.
Alcuni dei punti sui quali vale la pena evidenziare l'impatto che la pandemia ha

avuto sono:

- **Aumento tasso di povertà**
  Si stimano tra i 40 e i 60 milioni di *nuovi poveri* dovuti allo shock economico a seguito del COVID-19.

- **Istruzione**
  Gli studenti sono rimasti a lungo fuori dalle scuole e università. Per quanto ogni ente abbia provveduto a valide alternative (*e-learning* o *DAD*) si stima che circa il 68% dei ragazzi e ragazze negli Stati Uniti non abbia ricevuto in questo periodo una valida istruzione.

- **Mondo del lavoro**
  Il numero di persone che hanno perduto il proprio impiego è allarmante. Si ipotizza che si sia perso in ogni famiglia circa il 60% del reddito mensile, con valori più alti per i lavoratori informali

- **Commercio mondiale**
  Si registra una forte diminuzione nel valore complessivo di commercio internazionale. Stime conservative riportano valori fino a $-27\%$

- **Settori maggiormente colpiti: ristorazione e turismo**
  Tali settori hanno subito un drammatico impatto negativo a seguito della pandemia. Il numero di turisti internazionali, nonché il valore economico perduto sono estremamente allarmanti. Inoltre tale risvolto ha anche conseguenze gravi su milioni di posti di lavoro

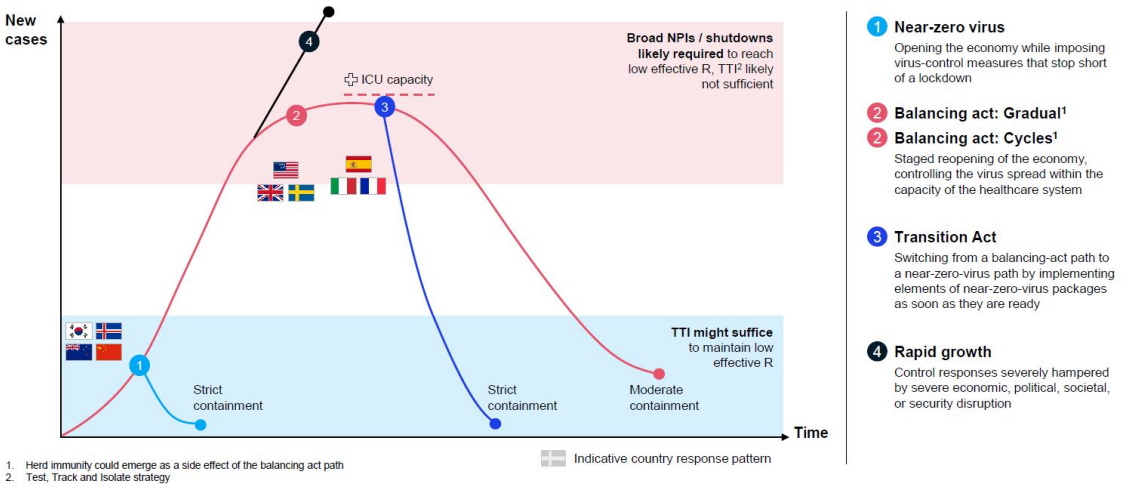



Figura 2.3: Nazioni a diversi punti della curva epidemica (al `4 Giugno 2020`) e stime di contagi per comportamento. Fonte: [33]

### 2.1.3 Precauzioni igieniche e strategie di prevenzione

Le precauzioni igieniche per il controllo della diffusione della malattia sono molto simili in ogni paese nel mondo. Gli enti come l'ISS (Istituto Superiore di Sanità), il Ministero della Salute, l'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) e il CDC (Center for Disease Control) hanno voluto mettere il punto sulle azioni da evitare e sulle precauzioni da impartire per contenere il COVID-19. Sono state tenute conferenze stampa e pubblicati innumerevoli articoli a riguardo in rete. L'immagine

Figura 2.4: Prevenzioni igieniche come indicate dall'Istituto Superiore della Sanità

2.4 è uno dei molti documenti visivi prodotti per sensibilizzare la popolazione. Dal sito dell'OMS si riportano solo alcuni dei punti più importanti:

- Lavarsi le mani regolarmente e meticolosamente
- Rispettare il distanziamento sociale
- Evitare i luoghi affollati
- Evitare di toccarsi il viso
- Rispettare una buona "igiene": coprirsi bene quando si tossisce e starnutisce e utilizzare sempre un fazzoletto per pulirsi le mani
- Restare a casa nel sospetto di contagio e alla prima apparizione di sintomatologia compatibile
- Contattare immediatamente il medico curante in caso di febbre, tosse e difficoltà respiratorie
- Mantenersi informato sullo stato della pandemia nella propria regione e prendere le notizie solo da fonti certificate e attendibili
- Disinfettare tutte le superfici quotidianamente (con maggiore attenzione a quelle con cui si hanno frequenti contatti, ad esempio interruttori, maniglie di porte, lavandini, telefoni fissi, ...)

Viene consigliato l'utilizzo di DPI (dispositivi di protezione individuale) laddove siano necessari.
Di interesse pubblico sono anche numerose "cure alternative" (tipo bevande alcoliche) o molti "miti di strada" che sono nati durante questi mesi. Sul sito dell'OMS questi vengono sistematicamente smentiti e per curiosità se ne riportano alcuni dei più creativi:

- Cospirazione del 5G: i virus non si trasmettono tramite onde radio
- Le bevande alcoliche: l'assunzione esagerata aumenta il rischio compromettendo funzioni metaboliche
- Utilizzo di antibiotici: il COVID-19 è causato dal SARS-CoV-2, ossia un virus. Gli antibiotici da uso domestico non devono essere abusati. Durante il ricovero si può essere sottoposti a cure antibiotiche per eventuali co-infezioni di natura batterica
- L'utilizzo di DPI durante l'esercizio fisico è sconsigliato: per una serie di motivi tra cui una mancanza di respiro e la produzione di sudore che bagnando la mascherina ne compromette l'utilizzo futuro
- L'utilizzo prolungato di DPI non causa alcuna intossicazione da $CO_2$ (anidride carbonica) nè insufficienza di ossigeno, sebbene possa oggettivamente risultare scomodo

- L'esposizione al sole o a temperature elevate non protegge dal contagio: non fare affidamento su calde giornate estive per limitare il rischio da infezione (cfr.1.3.5)

- Non utilizzare lampade UV (ultra violette) direttamente sulla pelle: queste possono causare irritazione e gravi danni agli occhi se usate impropriamente

A livello nazionale sono numerose le strategie di controllo che possono essere impiegate per limitare la diffusione. Ogni nazione detiene l'autorità per mettere in atto sensibili politiche con lo scopo di promuovere comportamenti consoni ad un stato di pandemia e il successivo ripristino alla normalità. Tali azioni devono essere repentine ed efficaci. L'OMS ne sottolinea alcune:

- **Coordinazione e pianificazione**
  L'implementazione di forti misure per la riduzione del contagio avviene a seguito di sforzi coordinati da parte di tutti gli enti governativi e di una buona pianificazione da parti di esperti, che tenga conto specialmente di quella fetta di popolazione che più risente di una pandemia (i poveri, gli indesiderati e i lavoratori instabili). Vengono anche evidenziate le problematiche che possono nascere da una popolazione demoralizzata e rinchiusa in casa, tra cui la più importante è la violenza domestica

- **Coinvolgere e mobilitare le comunità**
  Allo scopo di limitare l'esposizione di persone infette, si consiglia di promulgare azioni a favore delle comunità e associazioni che richiedono partecipazione attiva. Ciò implica solitamente una fiducia reciproca tra popolazione e autorità e deve essere eseguito secondo modalità consone alla tipologia dei destinatari. A maggior ragione per quanto riguarda le comunità più vulnerabili.

- **TTT: Test-Track-Trace**
  Per rallentare il contagio è sensibile che venga rafforzato su base nazionale il sistema sanitario per il testing dei sospetti infetti e per il tracciamento dei contatti durante i 14 giorni antecedenti. Si vuole anche evidenziare come la quarantena o l'auto isolamento preventivo siano attività fortemente stressanti e che possono comportare malcontento e demoralizzazione. È dunque obiettivo trasmettere appieno l'importanza di tale azione.

- **Fornire un servizio sanitario di alta qualità**
  Per ridurre la mortalità è necessario un potenziamento del servizio sanitario nazionale. Sebbene la maggior parte dei casi si risolva con la guarigione del soggetto infetto, si contano comunque numerose istanze dove è richiesta l'ospedalizzazione. Tale miglioramento deve essere effettuato anche tenendo conto del personale, che risulta fortemente esposto al patogeno.

- **Adattare politiche e strategie**
  a seconda della capacità del sistema sanitario, del rischio e della vulnerabilità. Ogni nazione ha le sue caratteristiche. Riconoscere punti di forza e criticità è alla base della promulgazione di politiche efficaci, in quanto la pandemia da COVID-19 ha costretto i governi e le popolazioni a sacrifici e compromessi.

## 2.2 La discussione sugli impianti di ventilazione

### 2.2.1 Il caso del ristorante cinese

Le precauzioni e strategie di controllo elencate nella sezione precedente sono importanti per il contenimento della diffusione del COVID-19. Se queste sono state perentoriamente promulgate e condivise dall'intera comunità scientifica, d'altro canto per quello che riguarda gli impianti di ventilazione e climatizzazione, centro e scopo di questo lavoro, si è dovuto aspettare una *scintilla* che scaturisse formalmente la problematica. Ad oggi si ritiene che l'articolo scientifico [34] abbia fornito finalmente gli spunti di discussione che hanno portato ad un'analisi completa ed approfondita del ruolo giocato dagli impianti `HVAC` (Heating Ventilation and Air Conditioning) nella trasmissione. Per completezza se ne riporta l'*abstract* prima di procedere con lo studio.

> During January 26–February 10, 2020, an outbreak of 2019 novel coronavirus disease in an air-conditioned restaurant in Guangzhou, China, involved 3 family clusters. The airflow direction was consistent with droplet transmission. To prevent the spread of the virus in restaurants, we recommend increasing the distance between tables and improving ventilation.

*Abstract* dell'articolo in bibliografia [34]

L'articolo riporta un caso di contagio tra persone per il quale sembra sia stato centrale il ruolo del flusso d'aria nell'ambiente, dovuto ad un impianto di climatizzazione (condizionatore a parete). Sebbene gli autori stessi, un team di medici, abbia affermato che il loro lavoro presentasse delle carenze, specie in campo ingegneristico e per quanto concerne il reperimento dei dati e le misure *in loco*, viene dichiarato apertamente che la trasmissione per sole *droplets pesanti* ($d \geq 5\mu m$) non può spiegare da solo il caso studio, per via della distanza tra le persone e il tempo di permanenza in sospensione in aria delle stesse. Non appoggiando completamente la posizione di *aerosolidez airborne droplets*, che però spiegherebbe comunque già da sè completamente la situazione, viene fatto notare come l'impianto di ventilazione abbia potuto accrescere la diffusione del contagio. Infatti, la chiave di lettura dell'articolo è proprio il flusso d'aria, che come si può vedere in figura 2.5 pare aver contribuito al trasporto dal tavolo `A`, ai tavoli `B` e `C`. Il ristorante era verosimilmente

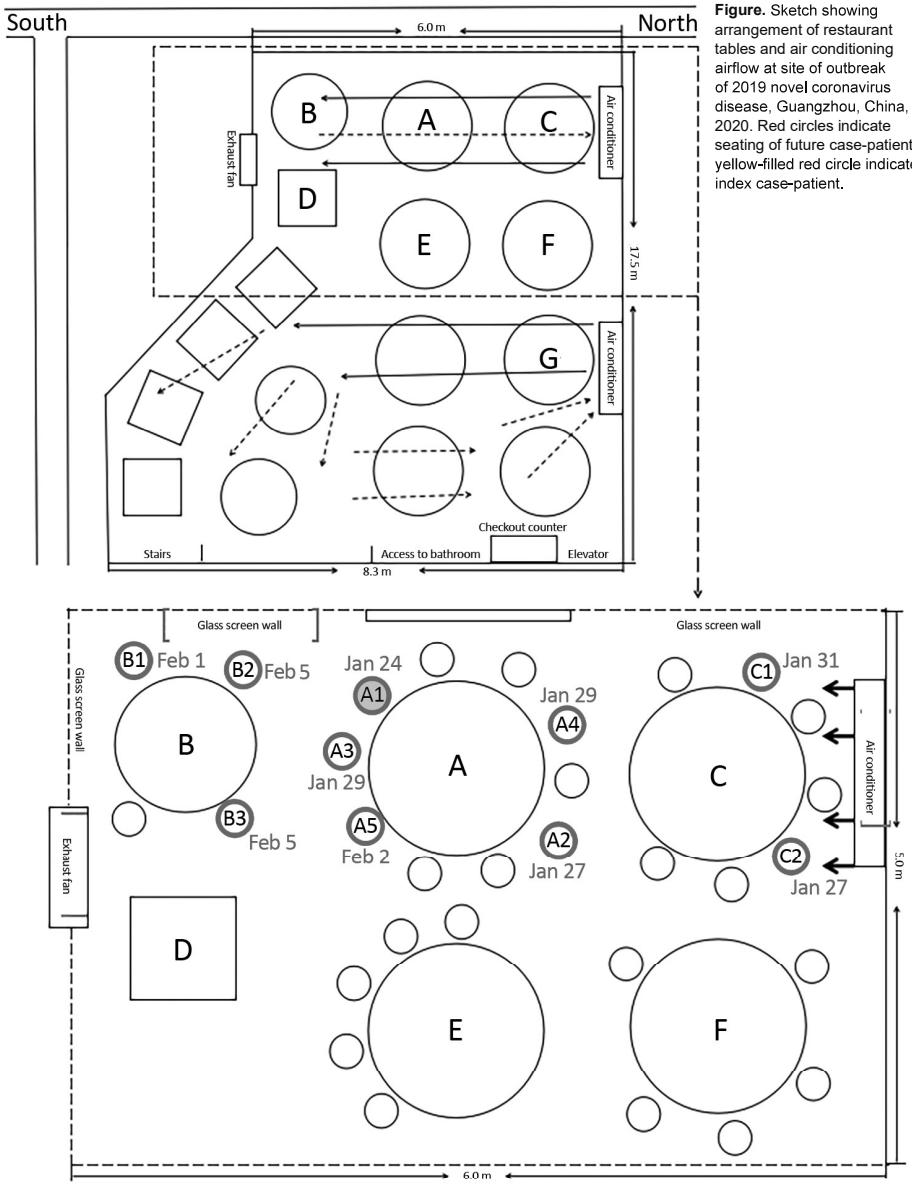



**Figure.** Sketch showing arrangement of restaurant tables and air conditioning airflow at site of outbreak of 2019 novel coronavirus disease, Guangzhou, China, 2020. Red circles indicate seating of future case-patients; yellow-filled red circle indicates index case-patient.



Figura 2.5: Rappresentazione ristorante di Guangzhou da [34]

molto affollato, essendo la vigilia del capodanno cinese. In conclusione nell'articolo viene enfatizzata l'importanza di prevenire la diffusione per mezzo di un controllo più raffinato della temperatura dell'aria in ingresso negli ambienti più affollati e per via di un miglioramento delle condizioni di ventilazione in ambiente. In [35], come d'altronde in altri commenti a [34], viene esplicitato come tale miglioria consista nell'aumento della portata di aria esterna, priva di carica virale attiva (come già detto in 1.3.5). Questo lavoro può essere considerato un primo passo verso la dimostrazione della componente airborne del SARS-CoV-2, sebbene, come già detto, gli autori non siano completamente a favore di questa modalità, evidenziando come nelle misurazioni in ambiente conseguenti lo studio, non si siano trovate tracce di RNA virale in aria, nè quantomeno altre persone all'interno del locale siano state infettate in maniera "anomala".
L'impianto di climatizzazione di questo ambiente risulta di qualità scarsa, e del tutto insufficiente a garantire le condizioni richieste dalle normative vigenti (perlomeno in Italia). Viene inoltre segnalato il fatto che sopra il tavolo `C` era presente un estrattore. Il movimento dell'aria all'interno dell'ambiente suggerisce che il patogeno sia stato trasportato da `A` agli altri tavoli. In seguito si suppone che all'interno dei nuclei familiari invece la malattia si sia diffusa tramite modalità conosciute (contagio diretto e secondario, anche in un tempo successivo e luogo diverso dal ristorante in analisi). Viene evidenziato anche come tra i commensali vi fosse una distanza consona alle teorie del distanziamento sociale. In ogni caso, si può attribuire parte della responsabilità alle insufficienze dell'impianto di climatizzazione, che in Italia sarebbe potuto essere una tipologia a tutt'aria, più efficace a diluire la concentrazione della carica virale. Inoltre impianti di tipologia a tutt'aria, con diffusione a soffitto (o a dislocamento a pavimento) evitano quella che può essere definita "compartimentazione dell'aria", ovvero la generazione di zone dell'ambiente in cui l'aria ha un flusso preferenziale a velocità relativamente elevate. I tavoli `E` ed `F` sono "compartimentati" rispetto ad `A, B` e `C` e non sono stati soggetti a trasporto di patogeno attivo.

## 2.3 I protocolli AICARR

Il primo ente che si vuole nominare nella parte centrale di questo secondo capitolo è l'organizzazione AICARR. Nata nel 1960, tale associazione si occupa principalmente delle problematiche relative all'uso consapevole dell'energia e delle risorse naturali, nonché dell'innovazione delle infrastrutture energetiche, sia nel settore impiantistico che in quello edilizio[1]. In Italia ha prodotto ampia documentazione sull'utilizzo degli impianti di ventilazione e climatizzazione durante la pandemia,

[1] dal sito AICARR: https://www.aicarr.org/

che hanno aiutato gli esperti del settore a omogeneizzarsi su una linea di comportamento ritenuta più consona all'emergenza sanitaria. Tali prontuari si sono susseguiti nel tempo in accordo con l'avanzamento della ricerca sul SARS-CoV-2. In linea di principio i criteri non sono cambiati in questi mesi, anche se su alcuni punti vi sono lievi divergenze che verranno in seguito evidenziate.

### 2.3.1 La ventilazione e il contagio

Il primo punto su cui si può sempre essere d'accordo è la necessità imperativa di ventilazione con aria esterna [36]. Molti di questi documenti seguono la teoria della diluizione perfetta, ovvero che il patogeno sospeso in aria venga perfettamente e uniformemente distribuito all'interno degli ambienti. È chiaro dunque che l'introduzione di "aria pulita" aumenti il volume su cui il virus si distribuisce diminuendo di fatto la probabilità di contagio. Inoltre si può pensare di mantenere accesi gli impianti 24 ore al giorno. Questo segue una delle teorie più comuni, che prevede la permanenza di cariche virali attive in ambiente anche dopo che le persone infette sono uscite dallo stesso. Mantenendo l'impianto sempre acceso (magari con una diminuzione nelle sue prestazioni durante i periodi notturni o comunque a seconda del tasso di occupazione durante l'arco della giornata) si può prevenire questa complicazione. Se nei periodi di bassa occupazione l'impianto può essere fatto funzionare parzialmente, durante la normale attività invece è consigliato farlo funzionare alla **massima velocità nominale**. Se sono presenti filtri ad alta efficienza non è prevista alcuna modifica nella configurazione dell'impianto stesso, in quanto tali elementi riducono sensibilmente la quantità di patogeno che circola all'interno delle condotte; altrimenti (come nella maggior parte dei casi per impianti del terziario) AICARR consiglia di valutare la possibilità di chiudere le vie di ricircolo. Queste infatti potrebbero permettere al virus di rientrare in ambiente, diminuendo il volume utile di diluizione e aumentando il rischio di contagio.
È dunque chiaro come, regolando l'immissione di aria e il suo movimento all'interno di ogni ambiente, gli impianti di ventilazione (sistemi che ne apportano ad una temperatura simile a quella interna, contribuendo solamente al ricambio, ma non al carico termico) e di climatizzazione (che invece introducono aria ad una temperatura adatta al riscaldamento o raffrescamento) possono effettivamente contribuire ad una diminuzione del rischio di contagio [37]. Ribadendo nuovamente che il miglior modo di ridurre tale rischio è l'introduzione di aria pulita esterna, l'associazione consiglia i seguenti interventi:

1. **Aumento della portata d'aria**
   Ciò può essere effettuato tramite controllo a distanza, per mezzo dell'intervento di personale specializzato che agisce direttamente sulla macchina oppure tramite sostanziali modifiche all'impianto stesso, qualora vi sia la necessità o sia stato a lungo rimandato. Tale aumento deve essere contestualizzato all'ambiente che asserve (in pressione o depressione) e si deve evitare che vengano

superati i limiti di potenza assorbita da parte dei ventilatori. È chiaro che l'aumento di portata per mezzo di inverter nei ventilatori deve essere applicato sia in mandata che in ripresa per mantenere costante la differenza di pressione in ambiente e nelle condotte.

2. **Forzatura delle serrande in sola aria esterna**
   Tale intervento prevede l'azzeramento della quantità di aria che ricircola nelle unità di trattamento e che, dall'ambiente viene presa e, dopo essere stata condizionata insieme all'aria esterna, vi viene re-immessa. La presenza di una quantità di carica virale in questo volume di ricircolo è incognita, ma per il criterio della massima sicurezza se ne vogliono evitare le possibili conseguenze. Tale intervento può essere effettuato tramite un controllo, oppure per mezzo di personale specializzato che agisce direttamente nei locali tecnici. Si evidenzia la necessità di bilanciare la chiusura del ricircolo con l'aumento di portata previsto al punto precedente: nello specifico bisogna controllare che il ventilatore non lavori in punto di funzionamento instabile.

3. **Disattivazione o bypass del recuperatore di calore**
   Questo punto è critico e verrà in seguito analizzato più approfonditamente. Infatti i recuperatori di calore sono delle sezioni delle UTA che garantiscono uno scambio termico tra aria in uscita verso l'esterno (precedentemente condizionata e proveniente dall'ambiente) e aria in ingresso (esterna). Tale interazione permette il recupero (da cui il nome) di una parte di calore sensibile e (a seconda della tipologia di scambiatore) latente e riduce il costo energetico del trattamento nelle batterie ad acqua. In ogni caso è plausibile l'esistenza di infiltrazioni e perdite in queste sezioni (seppur remote) che devono conseguentemente essere disattivate (o bypassate). Il bypass può anche essere visto nel contesto della massimizzazione di aria esterna immessa (poiché il recuperatore impone inevitabilmente delle perdite di carico). All'atto della riattivazione è imperativa la corretta sanificazione dell'elemento.

4. **Mantenimento del *setpoint* di umidità relativa al di sopra del** 40%
   Si faccia riferimento alla sezione 1.3.3 per le motivazioni di questo quarto punto. In ogni caso anche il valore percentuale di `UR` verrà in seguito sottoposto a integrazioni e modifiche. Tale regolazione dovrebbe essere in genere di facile applicazione tramite il controllo dell'unità di trattamento aria. Laddove non sia prevista una sezione di umidificazione, si può pensare all'introduzione di umidificatori portatili in ambiente.

5. **Funzionamento in continuo dell'immissione dell'aria esterna**
   Come già indicato in precedenza è consigliato il funzionamento in continuo dell'impianto durante l'intero arco della giornata. Ciò permette anche di avere ambienti perfettamente "lavati" alla riapertura dell'attività.

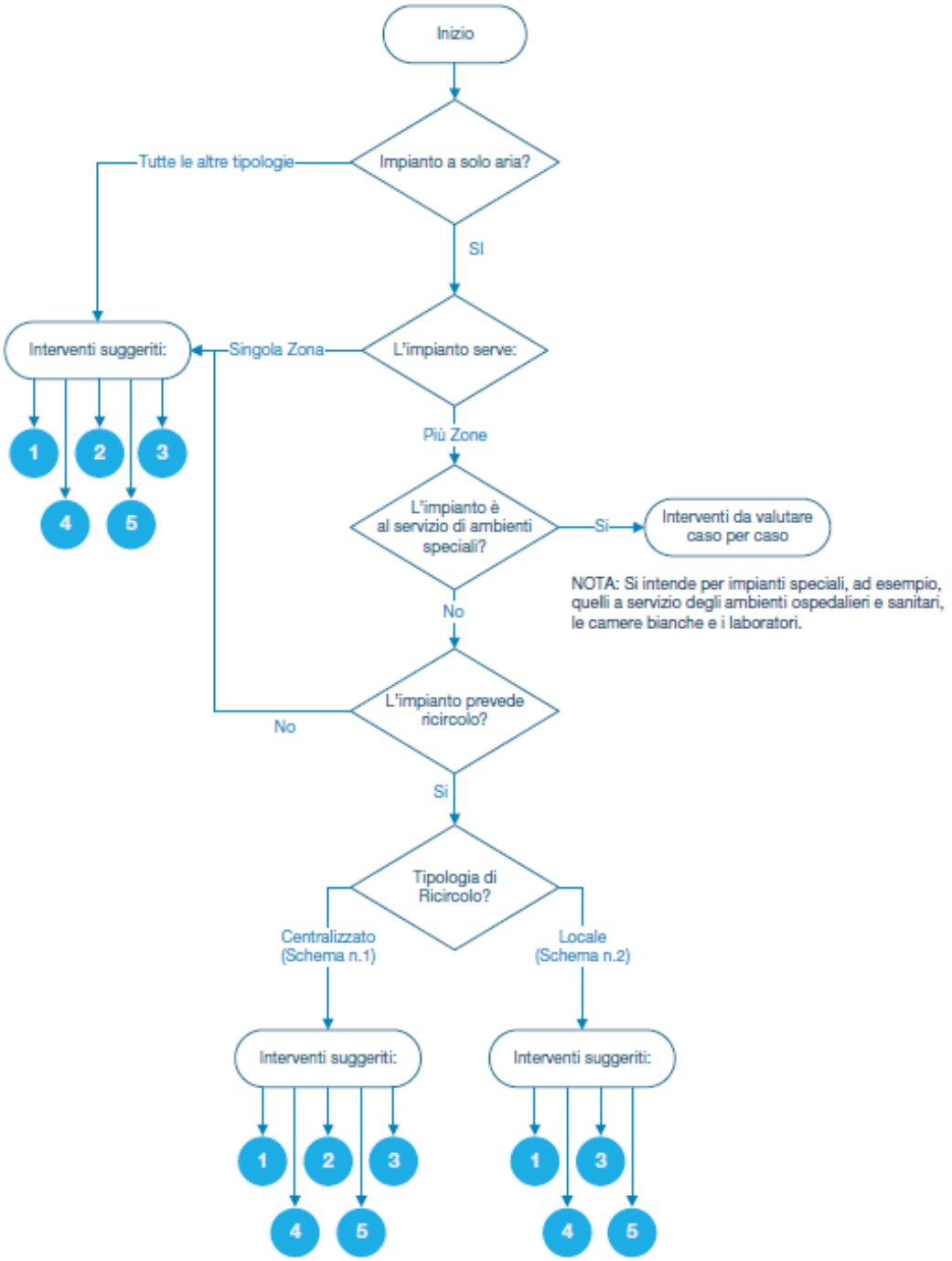



Figura 2.6: Diagramma di flusso per gli interventi suggeriti da AICARR. Fonte: [37]

### 2.3.2 Ulteriori considerazioni

I protocolli AICARR si sono susseguiti nel tempo e in questo scritto se ne vuole seguire l'ordine cronologico. Il documento proposto nel mese di `Aprile 2020` [38] risponde all'evoluzione della discussione nella comunità scientifica riguardo il ruolo degli impianti di climatizzazione (sebbene sia nell'edizione di Luglio, l'articolo [34] di cui alla sezione precedente 2.2.1 ha fatto la sua prima apparizione proprio in Aprile) e alla necessità di una presa di posizione da parte della più importante organizzazione a riguardo in Italia. Dunque, le ipotesi su cui i lavori che seguono sono basate, vengono riportate nel *Position Document* in questione. Queste sono:

1. Essendo la trasmissione airborne per mezzo di *droplets leggere* l'unica che realmente coinvolge gli impianti di climatizzazione, questa viene presa in considerazione e valutata nel contesto del criterio della massima sicurezza, sebbene, né al tempo, né ad oggi, l'OMS l'abbia validata come plausibile in tutti quegli ambienti non di natura sanitaria 1.4.1

2. Il fatto che tale modalità di trasmissione non sia convalidata, non significa che non esiste. Nonostante ciò è chiaro come questa non sia la principale fonte di contagi, nè quella preferenziale. Nella sezione 1.4 viene infatti definita *opportunistica*

3. La malattia viene diffusa per lo più per via di asintomatici che hanno contratto il virus, ma non ne sono a conoscenza, e dunque spargono cariche virali senza saperlo.

Sono state quindi presentate delle considerazioni a riguardo:

- Il virus non sarà debellato e la malattia potrà assumere la caratteristica di stagionalità ed endemia. Ciò era già stato comprovato da un dilagarsi di contagi di ritorno nei paesi cinesi e nelle zone che in primis avevano presentato la nascita dell'epidemia ed oggi in Italia con la *seconda ondata*

- Tale recrudescenza è a causa delle caratteristiche climatiche del nostro paese e assomiglia in tutto al comportamento che assumono raffreddore comune e influenza stagionale

- La ripartenza sarà lenta e laddove sia possibile evitare assembramenti e affollamenti è consigliato continuare ad adottare tutte le strategie di *smart-working*. Gli ingressi dovranno essere contingentati e scaglionati, specie in tutti quegli ambienti di pubblico accesso come negozi, supermercati, farmacie, ecc, ...

In ogni caso viene chiarito più volte che gli impianti **non devono essere spenti**. Questo poiché pur potendo in casi estremamente rari, aumentare la dispersione di cariche virali in ambiente, il totale spegnimento di un impianto può portare a conseguenze secondarie anche più gravi (come un estremo discomfort termico): nello

specifico il documento [38] fa riferimento alle persone anziane che vengono protette impedendo l'uscita dalla propria residenza, ma poi sottoposte al caldo torrido estivo o al freddo gelido invernale. Sono dunque molto più importanti, nel contenimento del contagio, tutte le altre precauzioni come i dispositivi di protezione individuale, i comportamenti consoni degli occupanti e il grado di affollamento.
Sia l'ISS che l'OMS valutano in maniera positiva l'immissione di un quantitativo di aria esterna maggiore, poiché questa risulti effettivamente incontaminata: l'aumento di tale portata deve essere garantito negli uffici e nei luoghi pubblici tramite modalità comprovate. Nella fattispecie viene fatto riferimento all'apertura dei serramenti (porte e finestre) [39]. Queste, seppur certamente apportando migliorie, non sono sufficienti e alle volte possono risultare anche dannose dando origine all'interno degli ambienti a zone in cui non avviene ricambio. In linea di principio il moto dell'aria non è noto a priori ed è dovuto, se non a una forzante esterna come potrebbe essere un impianto di ventilazione che ne controlla e impone velocità e direzione, a moti convettivi locali dovuti allo scambio termico con gli occupanti e con l'esterno e alle infiltrazioni dai serramenti. Il virus inoltre non può essere trasmesso nei canali a meno della presenza di un infetto in ambiente che immette il patogeno nei flussi trasportati: infatti, viene spesso fatta confusione con il problema della legionella (che però è un batterio e non un virus). Il SARS-CoV-2 non può proliferare al di fuori di un organismo e l'accumulo e riproduzione di carica virale non può avvenire nelle condotte dell'aria, né in alcun altro luogo esterno.
Nel `Luglio 2020` viene pubblicato un ulteriore documento [40] che definisce più approfonditamente alcuni casi specifici. Si fa infatti riferimento alla teoria di Wells e Riley come indicatore della relazione tra diluizione dell'aria e del patogeno per il rischio di contrarre la malattia (che verrà poi adeguatamente descritta e applicata in seguito, cfr. capitolo 4) e si evidenziano in maniera matematica i benefici dovuti all'aumento di presenza di aria esterna in ambiente. Per quanto riguarda quest'ultima viene fatto notare come sia importante che risulti effettivamente "pulita": tale termine indica una concentrazione di inquinanti atmosferici nel rispetto delle normative vigenti. Un'altro importante prerequisito per tale condizione è che non vi sia presenza di patogeno in sospensione: tale fatto potrebbe non essere rispettato qualora non siano state poste correttamente all'esterno dell'edificio le bocchette di mandata e di ripresa. Questo fenomeno viene solitamente indicato come "corto circuito" (termine evidentemente ripreso dall'elettrotecnica) e indica come i moti dell'aria possano essere fortemente disturbati dalla posizione errata degli *inlet* e *outlet*: se questi risultassero troppo vicini tra di loro i flussi non coinvolgerebbero l'intero ambiente (nel caso di una stanza chiusa) o potrebbero provocare una ripresa di aria "viziata" (con alto tasso di inquinanti) in espulsione verso l'esterno, invece che aria non trattata. È dunque imperativo che il protocollo sia affrontato a valle di considerazioni di questo genere. Vengono infatti meno tutte le ipotesi di perfetta assenza di patogeno nella portata esterna allorché le griglie siano cortocircuitanti.
Viene ripetuta la necessità di umidificazione, specie in inverno dove tale procedura

è energeticamente più impattante. Inoltre si pensa anche alla possibilità di creare delle zone privilegiate con ricambi d'aria localizzati di maggiore entità: questo è di centrale importanza in tutti gli ambienti sanitari o di degenza, dove i posti letto delle persone infette, o la posizione del paziente sottoposto ad un'operazione in sala chirurgica sono sempre noti a priori.
Per quanto concerne il tempo di funzionamento dell'impianto viene effettuata un'analisi più approfondita che prevede la distinzione tra i periodi transitorio e a regime e l'introduzione del parametro $\varepsilon_{cv}$ efficienza di ventilazione (in una delle sue numerose formulazioni). Quindi, contrariamente a quanto suggerito in precedenza, la valutazione della possibilità di un funzionamento in continuo dell'impianto dev'essere ponderata a seguito di ragionamenti che coinvolgano anche i periodi di transitorio e l'impatto energetico globale che le modifiche vengono a costare. Nel documento in questione [40] si identifica la seguente formulazione:

$$\varepsilon_{cv} = \frac{Q_{ideale}}{Q_{reale}}$$

Le portate a numeratore e denominatore devono necessariamente essere adeguatamente descritte:

- $Q_{ideale}$ rappresenta la portata d'aria in ingresso che garantisce una condizione ben specificata di concentrazione di inquinanti, sotto le condizioni di perfetta miscelazione
- $Q_{reale}$ è invece la quantità d'aria che garantisce le medesime condizioni, senza l'ipotesi di perfetta miscelazione

Tale valore va calcolato rispetto alla zona occupata (e non all'intero volume dell'ambiente) che in genere è definita sulla superficie a più alta concentrazione di occupanti per un'altezza di $1.80\,m$. Si riportano ora degli esempi:

- Qualora si riuscisse a far raggiungere la zona occupata da solo aria esterna si otterrebbe un $\varepsilon_{cv} > 1$. Ciò in quanto la concentrazione di inquinanti nella portata in immissione è minore di quella perfettamente miscelata. Segue $Q_{reale} < Q_{ideale}$: si ha bisogno di meno portata di quanta servirebbe nel caso di perfetta miscelazione
- In una situazione normale o carente, dove la zona occupata non risulta particolarmente privilegiata nel ricambio d'aria, si avrà $\varepsilon_{cv} \leq 1$. L'unità è raggiunta quando la perfetta miscelazione avviene in ambiente, prima di raggiungere la zona occupata. Laddove invece i flussi della aria compiano percorsi più lunghi si avrà una condizione nella quale è necessaria più portata esterna poiché l'aria si carica di inquinanti prima di "lavare" la regione in analisi.

Un basso valore di efficienza di ventilazione dà origine a transitori più lunghi e imprevedibili e a costi, sia in denaro che in termini di energia spesa, fortemente

aumentati. Tale parametro può rientrare anche nella definizione di volumi orari effettivi di ricambio d'aria locali della zona occupata secondo le modalità indicate in seguito:

$$n_{eff} = \varepsilon_{cv} \cdot \frac{Q}{Vol} \ [h^{-1}]$$

Si vede come una buona efficienza di lavaggio aumenti il valore di $n_{eff}$ con conseguenze che saranno più chiare nella prossima parte.
Per diminuire la concentrazione di cariche virali si può dunque fare riferimento alla miscelazione di aria esterna (priva) e di aria interna (carica) nella zona occupata tramite il lavaggio per mezzo di diffusori posizionati correttamente. Alla mandata di aria pulita consegue una ripresa di aria contaminata che viene espulsa tramite l'impianto di ventilazione. È chiaro come sia dunque importante considerare la direzione e velocità dei flussi, nonché la posizione della persona infetta in ambiente. Nelle aule universitarie tendenzialmente non si ha eccessivo spostamento di occupanti; in altri luoghi (ad es. supermercati) questo potrebbe invece giocare un ruolo più serio e va analizzato in maniera più approfondita. In tali ambienti è ancora più centrale l'ottenimento di perfetta miscelazione. Alternativamente, nuovi impianti prevedono il dislocamento. Il documento in analisi ne dà una definizione sintetica: questo si attua tramite l'introduzione di aria fredda dal basso e con velocità molto ridotte. I moti convettivi naturali che si instaurano nello scambio termico tra gli occupanti e l'aria fredda garantiscono la risalita dei flussi che vengono ripresi dall'alto. Poiché le sorgenti termiche sono, in questo caso, anche quelle inquinanti (SARS-CoV-2), si può facilmente notare come questa modalità di lavaggio dell'ambiente potrebbe portare numerosissimi vantaggi ($\varepsilon_{cv} >> 1$).

### 2.3.3 La questione dei recuperatori di calore

In 2.3.1 (da [37]) si legge che l'intervento numero 3 riguarda quelle sezioni delle macchine di trattamento dell'aria sotto il nome di **recuperatori di calore**. Questi servono lo scopo di ridurre il costo energetico che grava sulle batterie di scambio per mezzo di interazione tra aria in uscita e in ingresso alla `UTA`. Nel documento di `Luglio 2020` ne viene approfondito il ruolo nel contesto dell'aumento di rischio di contagio. L'idea che la presenza di COVID-19 mini tutti le tipologie di recupero termico viene messa in discussione, in quanto tali sezioni sono soventemente elemento fondamentale nel garantire un buon funzionamento della climatizzazione e del raggiungimento del comfort termico degli occupanti. Laddove si sia in presenza di una situazione simile il bypass o la disattivazione completa di tale componente può risultare impensabile. Vengono dunque identificati dei discriminanti che, caso per caso, possono dar luogo a ragionamenti più approfonditi rispetto al semplice spegnimento. I recuperatori esistono di due tipologie principali: a flusso incrociato (o piastre) e rotativi (o entalpici). I primi non prevedono alcuna interazione né contatto diretto tra le portate e dunque, a meno di forti criticità strutturali,

non presentano alcun problema di scambio di carica virale. Si ritiene dunque che scambiatori di questa tipologia possano essere lasciati in funzione a seguito di un'ispezione tecnica. I recuperatori rotativi sono invece fonte di discussioni in quanto sono spesso soggetti a ricircolo di inquinanti, nel caso in cui non siano accuratamente progettati o in mancanza di opportune sezioni di lavaggio e filtrazione. La rotazione non permette, in generale, di separare i flussi tramite tenute stagne e introduce vibrazioni e altri disturbi non facilmente quantificabili. Inoltre, coinvolgendo anche la componente del calore detta latente per mezzo di goccioline di vapore non si esclude che vi possa essere una trasporto di patogeno per tale via. In ogni caso, in presenza di sezioni di filtraggio adeguate, è chiaro come i piccoli ricircoli possano essere verosimilmente trascurati. Infine un corretto posizionamento dei ventilatori rispetto la senso di rotazione del recuperatore potrebbe avere la conseguenza di mettere in sovrappressione l'aria esterna rispetto al flusso in uscita. Seppur non evitando piccoli *backflow* tale accorgimento risulta in un'ulteriore riduzione del rischio (cfr. sezione 2.4.3).

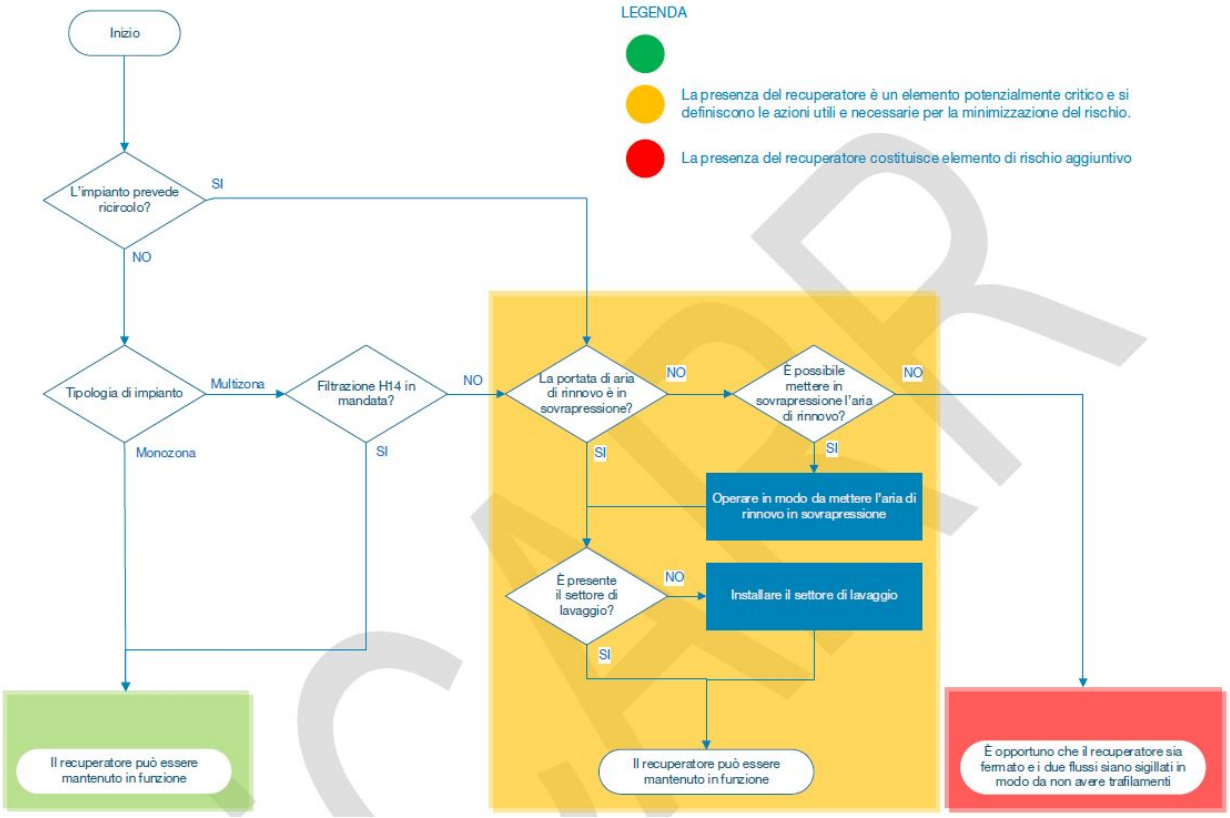



Figura 2.7: Diagramma di flusso per i rischi da recuperatore entalpico. Da [40]

### 2.3.4 Tipologie impiantistiche

Si vuole procedere con la presentazione di alcuni scenari plausibili sul territorio italiano. Sebbene questo lavoro si vuole concentrare in maniera più dettagliata sulle aule del Politecnico, e quindi su tutto quanto concerne i grandi ambienti per la didattica e assimilabili ad uffici, e la climatizzazione secondo le teorie degli impianti a tutt'aria, non si vogliono trascurare tante altre tipologie di impianto e ambienti con funzioni differenti.

- **Impianti a tutt'aria**
  Gli impianti a tutt'aria rientrano nella categoria di impianti di climatizzazione in quanto, non solo garantiscono il ricambio di aria tramite l'introduzione di aria esterna, ma apportano attivamente anche il carico termico necessario al comfort degli occupanti per mezzo di immissione in ambiente di aria a temperatura controllata (in riscaldamento e raffrescamento). Le aule del Politecnico sono dotate di sistemi di questa tipologia e più avanti se ne analizzeranno le parti in maggior dettaglio. Poiché in molti impianti di questa tipologia è previsto il funzionamento in tutta aria esterna, questi vengono dimensionati secondo i fabbisogni energetici conseguenti e sono dunque consoni ad essere utilizzati in condizioni di pandemia. È possibile effettuare una seconda distinzione:

  – Impianti *monozona* che asservono un unico ambiente. In questo caso il ricircolo non comporterebbe una *cross-contamination*, ovvero il patogeno non può essere trasportato da una stanza ad un'altra aumentando le persone a rischio contagio.

  – Impianti *multizona* che asservono ambienti assimilabili (ad esempio aule scolastiche). In questo secondo scenario il ricircolo (che deve essere sempre valutato in relazione all'abbattimento dei potenziali inquinanti in ambiente) può provocare il trasporto di virus e *cross-contamination*. I risultati sono un aumento di occupanti a rischio, ma al contempo si distribuisce la carica virale su un volume più ampio. Impianti di questa tipologia sono tendenzialmente a portata variabile e devono necessariamente poter parzializzare la potenza termica immessa.

- **Impianti ad aria primaria**
  Anche chiamati impianti misti questi garantiscono invece solo la componente di ventilazione e sono tendenzialmente progettati per lavorare esclusivamente in aria esterna. Il ricircolo è previsto unicamente nei transitori dove, per risparmio energetico, si evita di aumentare il carico termico con l'immissione di aria esterna, ma viene effettuato al 100% e in assenza di occupanti. Questa tipologia viene solitamente impiegata anche per un efficace controllo dell'umidità ed è dunque più che consona ad essere utilizzata in caso di pandemia.

- **Impianti a ricircolo locale di aria (con terminali in ambiente)**
  Questa terza ed ultima tipologia ha suscitato nella comunità scientifica un dibattito per quanto riguarda la sicurezza da contagio. Vengono solitamente integrati da un impianto di ventilazione ad aria primaria, che può dunque garantire l'apporto di aria esterna, ma la discussione si è svolta sul loro ruolo di distribuzione di carica virale in ambiente: qualora infatti contribuissero in maniera sostanziale a nuovi moti caotici dell'aria in ambiente che hanno la possibilità di trasportare il patogeno a distanze maggiori (o abbassando la $\varepsilon_{cv}$) si potrebbe sostenere valida l'ipotesi di spegnerli. AICARR sostiene che i ventilconvettori e gli split (ovvero i terminali in ambiente) non rappresentano un pericolo. Segue un elenco dei pro e dei contro che hanno portato a questa conclusione:

  + Sono fondamentali nel garantire l'apporto del carico termico. È già stato evidenziato come il comfort degli occupanti sia il primo scopo dell'impianto di climatizzazione e abbia un forte impatto sul rischio di contagio
  + Tendono a favorire la miscelazione dell'aria nel volume al di sopra delle teste degli occupanti, spingendo di conseguenza il valore di $\varepsilon_{cv}$ verso l'unità
  + Possono essere usati per aumentare la diluizione dell'aria in ambiente con aria pulita esterna proveniente dall'impianto di ventilazione ad aria primaria
  + Non presentano criticità se sono posizionati in concomitanza di grandi serramenti e di ventilazione meccanica forzata

  – Non sono in genere dotati di filtrazione interna adeguata al contenimento del contagio. Il virus dunque li riesce ad attraversare per intero e non viene fermato all'interno.
  – Possono risollevare particolato infetto depositato sulle superfici ad esempio dal pavimento (specie se la ripresa avviene dal basso), pareti (sono sempre elementi posizionati a parete) o filtri interni. Questo difetto può però essere controbilanciato dall'utilizzo del termo-ventilconvettore alla velocità minima, oppure tramite una costante e corretta sanificazione dell'ambiente

  Sugli impianti a ricircolo locale si estendono le argomentazioni in 2.5.2.

### 2.3.5 Strategie di pulizia e disinfezione

Nella documentazione si presenta in maniera molto dettagliata come devono essere effettuate le pulizie a seguito della pandemia. Vengono evidenziate ogni possibile sezione di una `UTA` e ne viene descritta a fondo la tecnica di lavaggio. Si vuole in questo scritto riportare solo quali sono le fasi principali di ciascun processo di pulizia:

1. Ispezione visiva che consiste nella primissima analisi del processo. Permette di accertarsi dello stato igienico e generale del componente in questione. Un occhio esperto può trarre già numerose informazioni solamente da una prima occhiata

2. Analisi tecnica, ovvero una valutazione più approfondita dei rischi che il componente in questione può porre sia agli occupanti in ambiente, sia agli operatori che si occupano della pulizia. Vengono effettuate le prime scelte su come procedere (ad esempio la scelta dei prodotti e le modalità di smontaggio, se fosse necessario). È seguita dall'ispezione tecnica che valuta infine la fattibilità e l'efficacia del lavoro.

3. La bonifica del sistema viene dunque effettuata dal manutentore specializzato secondo le modalità descritte durante l'analisi tecnica.

4. Infine l'analisi post-intervento comprova la buona riuscita della bonifica e in questa fase viene stilato il rapporto finale che comprende ogni ragionamento delle fasi precedenti, nonché una check-list degli interventi effettuati

Ogni parte dell'impianto deve essere sottoposta a controllo ed, eventualmente, a pulizia. Questo si compone in prima battuta di: unità di trattamento aria, condotte, componenti di linea e terminali. Per un'analisi dettagliata di ciascuna parte e la descrizione delle procedure da seguire si rifà al documento in questione [40].

## 2.4 I protocolli ASHRAE

La seconda organizzazione che ha pubblicato estensivamente sull'argomento è `ASHRAE` (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*). Fondata nel 1894 rispecchia molto nel mondo oltreoceano quello che AICARR è in Italia. La sua missione si concentra sui sistemi di asservimento all'edilizia, sull'efficienza energetica, sui principi dell'IAQ (Indoor Air Quality) e sulla sostenibilità industriale [2].
Il `23 Marzo 2020` l'organizzazione scrive al direttore generale della OMS mettendo a disposizione le conoscenze degli oltre 57.000 soci in 132 paesi per combattere il diffondersi della pandemia. Viene subito dunque riconosciuto ufficialmente il ruolo che gli impianti di ventilazione possono giocare nel trasporto del patogeno. Seguono dei punti elenco che rappresentano ogni possibile ambiente dove le competenze dei soci possono essere applicate e gli ambiti dove la pandemia ha spinto a migliorare e rendere più performante l'utilizzo corretto di sistemi HVAC. Il primo documento

[2] Dal sito ASHRAE: `https://www.ashrae.org/about`

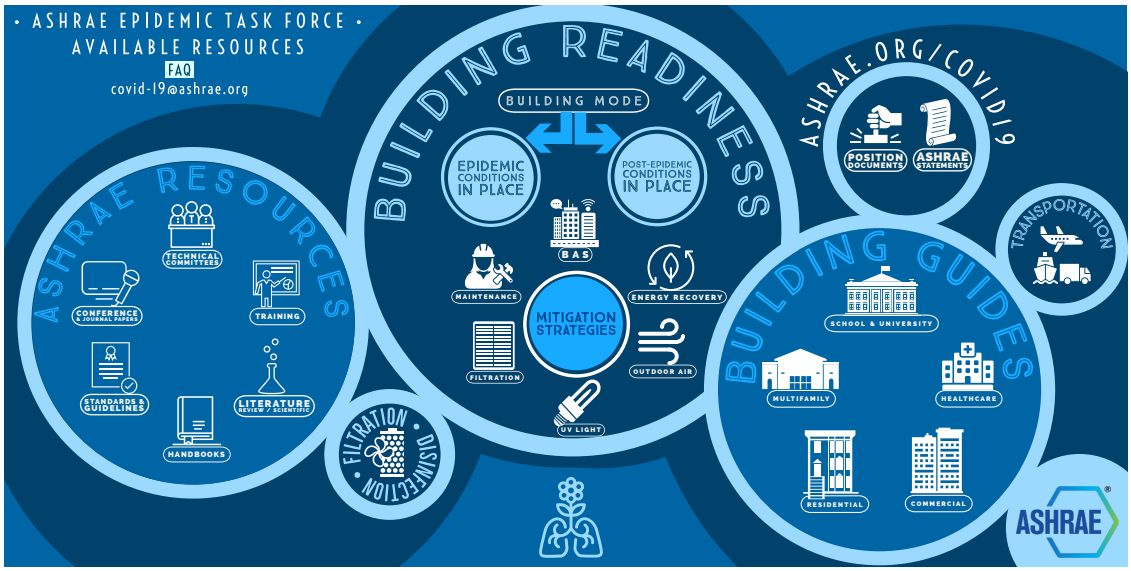



Figura 2.8: Infografica dell'organizzazione ASHRAE per la pandemia da SARS-CoV-2

che si può analizzare a riguardo risale all'`Aprile 2020` [7]. È stato usato in precedenza in questo lavoro per l'interessante introduzione sui metodi di trasmissione airborne, ma può ora essere letto nella sua interezza includendo anche i consigli pratici e le implicazioni che tale metodologia di contagio ha sulla gestione degli impianti di ventilazione. L'articolo in questione fa riferimento non specificatamente al SARS-CoV-2, ma a tutti i virus con componenti airborne. È inoltre molto generale e nelle prossime sezioni se ne farà uso limitatamente. Vengono dunque presentati altri scritti pubblicati che si concentrano maggiormente sulla pandemia in corso in figura 2.8.
Nel primo [41] vengono poste due interessanti domande che impostano lo studio e le analisi che seguono:

1. Quali sono gli interventi ingegneristici che posso essere attuati per minimizzare la diffusione della malattia attraverso l'aria?
2. Quanto sono efficaci tali interventi ingegneristici nel minimizzare la diffusione della malattia?

Sempre nello stesso scritto l'organizzazione dichiara esplicitamente la sua posizione rispetto alle due tematiche centrali che ruotano attorno all'argomento:

> La trasmissione del SARS-CoV-2 attraverso l'aria è sufficientemente probabile che l'esposizione *airborne* al virus dovrebbe essere monitorata. Cambiamenti alle configurazioni edilizie, incluse le operazioni di riscaldamento, ventilazione e i sistemi di condizionamento dell'aria, possono ridurre tale esposizione.

> La ventilazione e filtrazione garantite dagli impianti HVAC possono ridurre la concentrazione di SARS-CoV-2 e conseguentemente il rischio di trasmissione per via aerea. Ambienti non condizionati possono causare un discomfort termico agli occupanti tale da essere di per sé potenzialmente fatale e che può anche ridurre la resistenza all'infezione. In generale, la disattivazione dei sistemi HVAC non è una misura consigliata per ridurre la trasmissione del virus.
>
> *ASHRAE Statements* dall'articolo in bibliografia [41]

Vengono dunque chiariti infine i punti centrali della missione che l'ente ASHRAE si propone di portare avanti tramite la pubblicazione di documentazione specializzata sull'argomento. Questi possono essere riassunti come:

- Riconoscere le potenziali devastanti conseguenze di una pandemia come quella da COVID-19 e produrre quanti più prontuari e linee guida per aiutare i tecnici e gli esperti a minimizzare la diffusione della malattia
- Promuovere *meeting* online ed eventi e attività di formazione per l'applicazione corretta degli interventi proposti per qualunque tipologia di ambiente in analisi (sanitario, residenziale, terziario, ecc. . . )
- Favorire lo sviluppo e la ricerca e prendere spunto dagli articoli pubblicati dai soci per stilare documenti accurati e aggiornati e che possono aiutare nel superamento di questa pandemia e di eventuali future
- Evidenziare e informare le autorità competenti, i tecnici specializzati, gli esperti del settore e in generale le comunità riguardo il ruolo importante che i sistemi HVAC possono giocare nel ridurre il rischio da contagio

### 2.4.1 Building Readiness: operazioni preliminari

Con il termine inglese *Building Readiness* si intende la preparazione (o prontezza) di un edificio ad essere occupato in condizioni di pandemia. Ciò si ottiene tramite i consigli presenti nel documento all'URL in Sitografia [66]. I punti trattati in questo scritto ricalcano in gran parte quelli già indicati nella sezione 2.3.1, ma si indicano anche tutte quelle precauzioni che esulano dai sistemi di ventilazione tra cui:

1. **Riduzione del livello di occupazione massimo consentito**
   Di questo parametro se ne parlerà ampiamente nei prossimi capitoli. È logico pensare che durante l'epidemia il numero di persone che possono essere ammesse in un determinato ambiente vengano ridotte. I valori percentuali sul totale ammissibile sono vari e verranno riaffrontati nell'ottica del rischio di contagio

2. **Obbligo di indosso di DPI**
   Questo punto è centrale nella riduzione di cariche virale immesse in ambiente e ad oggi è rispettato nella totalità degli ambienti chiusi di vendita al dettaglio o aperti al pubblico, che non implichino la consumazione sul posto di cibo o bevande

3. **Distanziamento sociale**
   tra banchi e scrivanie, e nei locali del personale, sale conferenza, ascensori, ecc .... In alcuni ambienti i principi del distanziamento sociale possono essere più ardui che altrove da applicare. Ad esempio in cavedi o locali tecnici tendenzialmente angusti o in ascensori occupati dal pubblico. È imperativo regolamentare l'accesso scaglionato in questi luoghi

4. **Igiene personale e disinfezione degli ambienti**
   Questo aspetto è già trattato ampiamente nelle sezioni precedenti e riguarda il livello di pulizia personale e delle superfici. Devono dunque essere garantiti dispensatori di gel igienizzante per le mani, possibilmente all'ingresso di ogni macro-zona e incrementare la frequenza e l'intensità delle operazioni di disinfezione in ogni luogo

Nel documento in analisi vengono indicate nel dettaglio tutte le procedure preliminari che i proprietari o i responsabili di ogni edificio dovrebbero affrontare prima di procedere allo studio del rischio di contagio. Si fa riferimento a:

1. **Reperimento di materiale e documentazione tecnica** sulle tipologie di impianti e sugli ambienti che asservono. Questi hanno lo scopo di chiarire la configurazione globale della ventilazione controllata in ogni ambiente (impianti mono-zona e multi-zona, tipologia ad aria primaria, tutt'aria, ricircolo locale, ecc ...)

2. **Ispezione *in loco* dei macchinari**. Ciò include ogni componente e sezione e si invita a fare maggiore attenzione a tutte le parti mobili, quali ad esempio recuperatori rotativi e serrande di regolazione

3. **Integrazione dei protocolli ASHRAE** tramite lo studio di interventi *ad hoc*. Per questo punto è consigliato stilare numerosi *report* che qualifichino la situazione e l'attuabilità ed efficacia degli interventi proposti.

4. **Controllo adeguato di tutti i sistemi di tele-controllo** che agiscono sulla regolazione delle configurazioni dell'impianto. I sistemi più recenti ed efficaci sono quelli in remoto che prevedono la possibilità di agire sulle macchine da un server tramite un PC od un *tablet*.

Per quanto riguarda i sistemi di tele-controllo questi intervengono sulla base di una quantità di dati reperiti da sensori posti nelle condotte e in ambiente. La

tipologia di sensore e di parametro misurato può essere molto varia (pressione, temperatura, umidità, $CO_2$, portata, ecc...). Si consiglia anche dunque un *check* sulla sensoristica o una ritaratura apposita che tenga in considerazione anche le nuove condizioni di pandemia.

### 2.4.2 Building Readiness: interventi HVAC

Il primo intervento proposto è senza dubbio quello che ogni prontuario di qualsiasi ente propone ovvero **l'aumento di portata di ventilazione**. Si evidenziano nuovamente le criticità dell'utilizzo di sola portata esterna rispetto alle prestazioni energetiche dell'impianto nell'ottica del mantenimento del corretto livello di comfort termico. **Il valore di umidità relativa è consigliato tra il 40% e il 60%**. Viene fatto notare come il passaggio da il 20% di aria esterna al 90% raddoppi la quantità di acqua fredda richiesta dalle batterie di condizionamento e triplichi le cadute di pressione e perdite di carico nell'impianto. Tutti questi parametri devono essere presi in considerazione nelle modifiche apportate. In ogni caso, laddove il sistema sia stato progettato per il funzionamento continuo in tutta portata esterna, tendenzialmente questi problemi sono già stati affrontati dal progettista che ha dimensionato le componenti conformemente a tale configurazione. Inoltre l'aumento di aria immessa ha un effetto sulla pressurizzazione dell'ambiente: qualora infatti la mandata venisse aumentata e la ripresa tenuta al valore di design si potrebbero creare piccoli inconvenienti come lo sbattere di porte e finestre, la difficoltà a chiudere serramenti, rumore e fischi per trafilazioni e *backflow* non previsti. Queste variazioni sono trascurabili in ambienti come aule e uffici (e quindi quelli in analisi in questo testo), ma potrebbero ripercuotersi gravemente su alcuni ambienti in cui il valore di pressione ambientale è importante e delicato (ad esempio bagni, cucine, ecc ...).
Per quanto riguarda il funzionamento in continuo l'ASHRAE utilizza un modello matematico (molto simile a quello che verrà impiegato per la teoria del rischio di contagio nella prossima parte) per determinare la quantità di aria che, in assenza di occupanti infetti, è necessaria per rimuovere il 95% di cariche virali in ambiente. Tale valore risulta pari a 3 volumi. Tendenzialmente questo parametro si aggira intorno alle 2 ore a tutta aria esterna, più che accettabile per la quasi totalità dei sistemi in circolazione (con 2 ore si intendono i periodi singoli di avviamento e spegnimento, per un totale, dunque, di 4 ore). In genere viene sconsigliato di spegnere completamente gli impianti negli edifici vuoti per l'emergenza onde evitare la nascita di condizioni sfavorevoli negli ambienti. Segue una piccola dimostrazione:

Definisco: $V$ $[m^3]$ volume dell'ambiente, $Q$ $[m^3/h]$ portata immessa ed estratta costante nel tempo, $C$ concentrazione di carica virale in ambiente. Segue:

$$VdC = (Q_{in}C_{in} - Q_{out}C_{out})dt$$

che indica la variazione di concentrazione in ambiente per effetto della portata. Poiché $C_{in} = 0$ (l'aria in ingresso è quella esterna priva di infezione) e $C_{out} = C$ (la portata in uscita è quella estratta dall'ambiente sotto le condizioni di perfetta miscelazione) si ha:

$$VdC = -QCdt$$

ovvero:

$$\frac{dC}{C} = -\frac{Q}{V}dt$$

Integro fra il tempo nullo e il tempo $t$:

$$\int_{C_0}^{C} \frac{dC}{C} = \int_0^t -\frac{Q}{V}dt$$

Risolvendo gli integrali si ha:

$$ln(C) - ln(C_0) = -\frac{Qt}{V}$$

Per le proprietà dei logaritmi:

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(-\frac{Qt}{V}\right) = e^{-N}$$

Definisco:

$$N = \frac{Qt}{V}$$

come i ricambi volumici (adimensionali). Per ottenere una riduzione del 95% si impone $C/C_0 = 0.05$ e si ottiene $N \approx 3$.
Tramite la formula inversa si può trovare, in funzione dei ricambi orari $n$ $[h^{-1}]$, il tempo del transitorio di accensione e spegnimento:

$$t = \frac{N}{Q/V} = \frac{N}{n}$$

### 2.4.3 Le strategie di recupero energetico

Di strategie per il recupero di parte dell'energia termica dell'aria esausta se ne è già ampiamente parlato in sezioni precedenti. In questo paragrafo si descrivono le considerazioni proposte da ASHRAE.
La prima tecnica è quella del ricircolo intenzionale. Questo deve sempre interessare una percentuale dell'aria totale immessa allo scopo di garantire un apporto minimo di portata esterna per la diluizione di inquinanti in ambiente. Ciò rientra appieno nei principi dell'`IAQ`, ma deve essere integrato nel contesto della pandemia

da SARS-CoV-2. È infatti plausibile che molti sistemi HVAC siano stati progettati non tenendo a mente la possibilità di trasporto di aerosol infetti. Le modifiche devono essere apportate con la conoscenza delle possibilità dell'impianto e delle conseguenze che possono ripercuotersi su altre sezioni e sul comfort degli occupanti, che possono aumentare il rischio invece che mitigarlo. ASHRAE consiglia, laddove sia possibile applicare il funzionamento dell'impianto in totale aria esterna, di **aumentare la portata di aria elaborata dai ventilatori e chiudere le serrande di ricircolo**.
Un altro elemento di recupero è trattato in sezione 2.3.3 e la documentazione ASHRAE amplia la discussione e approfondisce alcuni aspetti in maniera più dettagliata. Nello specifico viene fatto esplicito riferimento al discorso sulla distribuzione delle

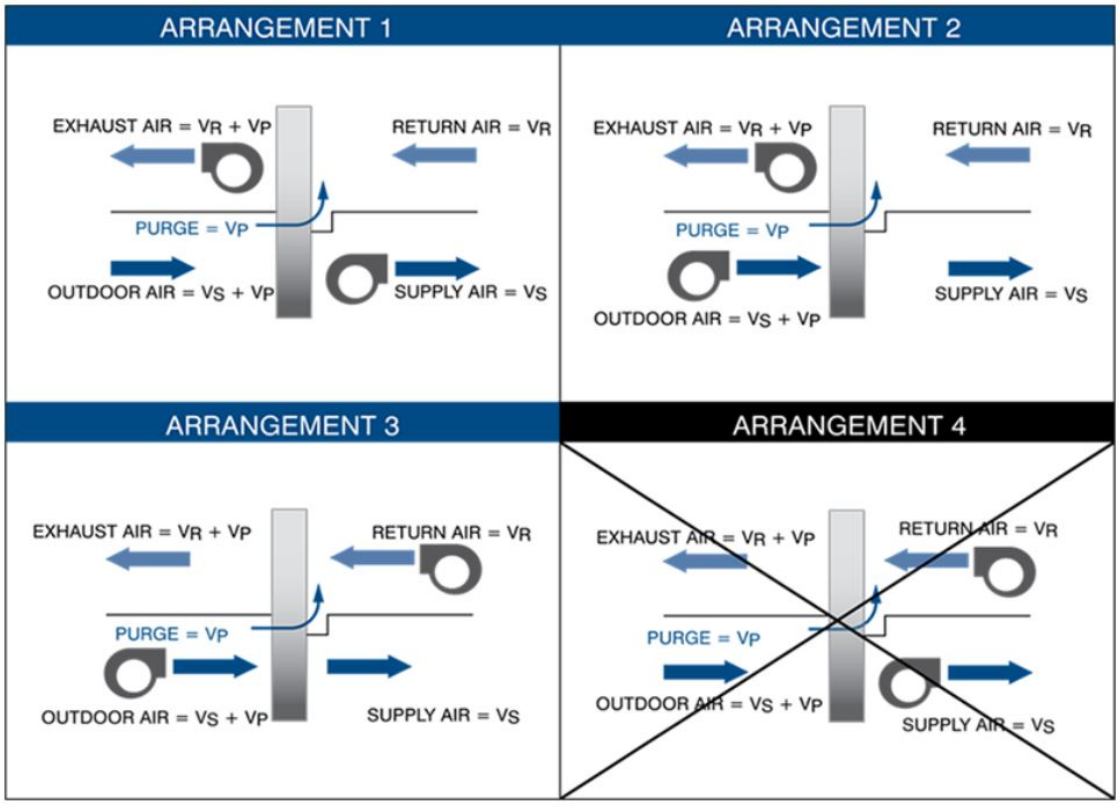



Figura 2.9: Configurazioni possibili delle sezioni di recupero del calore per mezzo di ruota entalpica. Immagine da sito [66]

pressioni, evidenziando come questo sia un discriminante tanto centrale da poter permettere il funzionamento del recuperatore anche in condizioni di pandemia, allorché invece molti enti ne hanno irrevocabilmente impedito l'utilizzo. In figura 2.9 si rappresentano le quattro possibilità di configurazione. La quasi totalità dei sistemi installati è impostato secondo le modalità dell'*arrangement* 1 o 2. Il protocollo ASHRAE esplicita come una differenza tra mandata e ritorno di 0.5 *pollici*

*di colonna d'acqua* (o 124 $Pa$) possa garantire infiltrazioni al di sotto del punto percentuale, di fatto non contribuendo significativamente al trasporto di patogeno.

- Nel caso in cui la configurazioni rispecchi l'*arrangement* 2 e le pressioni rispettino le condizioni precedentemente indicate si è sufficientemente sicuri per poter mantenere in funzione la sezione di UTA. Le pressioni favoriscono l'andamento delle infiltrazioni dal flusso di aria esterna a quello di ritorno, non contribuendo di fatto all'immissione di virus in ambiente.

- Nei casi di *arrangement* 1 o 3 si invita a far attenzione alla presenza di altre componenti che impongono una perdita di carico tra il ventilatore e la ruota entalpica, poiché queste potrebbero impattare sulla pressione statica in ingresso o uscita dalla sezione. Ciò causerebbe un non rispetto del differenziale non garantendo dunque la massima quantità di infiltrazioni. Si suggerisce un controllo *in loco* ed eventualmente la messa fuori uso del recuperatore se ammissibile per le questioni energetiche

- L'*arrangement* 4 è invece fortemente sconsigliato. In questa ultima configurazione infatti le pressioni favoriscono l'andamento delle infiltrazioni verso la mandata in ambiente.

Viene inoltre suggerita in ogni caso l'ispezione del componente e la sua disinfezione completa. Tale procedura deve garantire l'assenza di danni strutturali (che possono comportare infiltrazioni) risultanti dall'usura e il buono stato delle guarnizioni e delle serrande di regolazione. È infine buona regola anche pulire i filtri e verificarne il funzionamento per mezzo del salto di pressione. In ultimo è in ordine un controllo generale delle condotte e delle griglie per scongiurare la presenza di ostacoli al percorso indisturbato dell'aria (specie le condotte che prelevano l'aria dall'esterno). Per quanto riguarda la ruota entalpica è suggerita una procedura più approfondita che prevede tre procedure differenti:

1. **Ispezione con sistema spento**
   Questo primo passo deve dare risposta ad alcune semplici considerazioni di carattere generale come lo stato della pulizia, l'entità di eventuali danni strutturali visibili, il corretto funzionamento delle guarnizioni e la presenza di una sezione di lavaggio. Tale sezioni garantiscono ancora meglio la mitigazione efficace del rischio di contagio e giustificano ancor di più il mantenimento in funzione del recuperatore.

2. **Ispezione con sistema in funzione**
   In secundis si procede con il controllo dell'effettiva rotazione del recuperatore. Seppur fornito di sensoristica adeguata, la conferma positiva che la ruota entalpica sia in moto è parte integrante di una buona ispezione completa. È inoltre opportuno determinarne la velocità angolare e il verso di rotazione.

Infine si consiglia la valutazione numerica delle pressioni statiche nei quattro compartimenti (mandata e ritorno, prima e dopo la sezione).

3. **Valutazione delle infiltrazioni**
   Ciò si effettua tramite lo studio delle pressioni che in figura 2.10 sono denominate `SP1,SP2, SP3` e `SP4`.

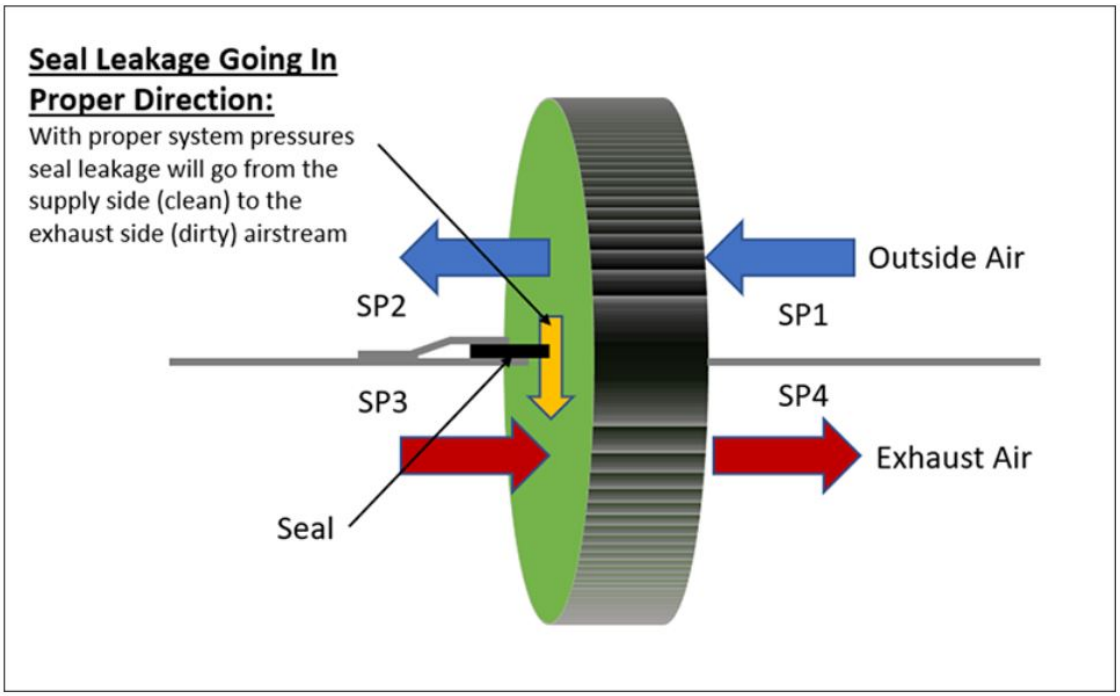



Figura 2.10: Verso corretto delle infiltrazioni. Immagine da sito [66]

### 2.4.4 La questione della filtrazione: introduzione generale

Un argomento trattato in maniera particolarmente dettagliata nei documenti ASHRAE è quello della filtrazione. Si vuole iniziare però con un piccolo riassunto sulle modalità di funzionamento dei filtri più standard, la nomenclatura e l'efficacia delle diverse tipologie.
La pandemia da COVID-19 rientra a tutti gli effetti nella categorizzazione `CBR` (Chemical, Biological, Radiological) che racchiude in sè la totalità dei possibili attacchi ai sistemi di filtrazione degli impianti di ventilazione. Si evidenzia inizialmente la sostanziale differenza tra *air-filtration* e *air-cleaning*: il primo processo (quello in analisi) prevede la rimozione di aerosol, bioaerosol e particolato generico in ambiente delle specie più pericolose perché inodori e incolori (invisibili), mentre il secondo fa unicamente riferimento a gas, odori o vapori di dimensioni molto superiori che

possono portare un diretto discomfort immediato agli occupanti. Per queste due categorie vengono utilizzati due sistemi diversi solitamente in combinazione: un filtro anti-particolato, la cui efficacia è fortemente dipendente dalle dimensioni dell'agente CBR, della tipologia e delle condizione operative, e un sorbente. Prima di andare a categorizzare i vari *particulate filter* in commercio (che ovviamente sono responsabili della riduzione in aria dei patogeni di tipo virale come il SARS-CoV-2) si vogliono riportare tre grandi questioni che vanno analizzate e risolte a monte dello studio specifico per la pandemia:

- La presenza di infiltrazioni o bypass rende del tutto inefficace la sezione di filtraggio qualsiasi la sua potenza. Infatti apportare migliore al sistema, non additando problemi di bypass potrebbe portare a costi sostanziali e a vantaggi del tutto inesistenti. Si voglia dunque preventivamente controllare lo stato strutturale del frame di contenimento del filtro.

- L'efficacia del filtro viene con un costo, non solo in denaro, ma in perdita di carico. Infatti, per come si vedrà in seguito, tanto più efficace la filtrazione tanto più grande è il salto di pressione che si instaura tra monte e valle. È importante dunque non apportare cambi sostanziali alle sezioni dell'UTA senza prima controllare operativamente il funzionamento corretto dei ventilatori: qualora il $\Delta p$ risultasse infatti troppo elevato, nascerebbero problemi di altra natura che minano l'efficacia del miglioramento e comportano ulteriori costi in denaro (ad esempio la sostituzione di vecchi ventilatori con nuovi più cari).

- Infine non si sottovalutino le infiltrazioni attraverso l'involucro dell'edificio, dei locali tecnici e in generale di ogni ambiente che è in contatto diretto con l'esterno. Qualora la pressione differenziale non sia attentamente monitorata, queste possono essere sostanziali, immettendo una quantità di aria non filtrata non indifferente. Nel caso della pandemia da SARS-CoV-2 questo ultimo punto è del tutto ininfluente in quanto l'aria esterna è priva di patogeno attivo.

I tipi più comuni per i filtri da sistemi di ventilazioni sono quelli meccanici o elettrostatici (*electrostatically enhanced filters*). Questi fanno uso di un mezzo fibroso: le fibre sono poste in direzione casuale perpendicolare al flusso dell'aria e hanno un diametro che spazia tra il micrometro e i $50\mu m$, la densità di imballaggio è compresa tra 1% e 30% e il materiale può essere cotone, vetroresina, polipropilene, poliestere, eccetera .... L'efficienza di raccolta del filtro di particolati e inquinanti è fortemente dipendente dalla velocità con cui l'aria attraversa la sezione di filtraggio: infatti quanto questa diminuisce l'efficacia migliora. Nel caso di un pannello piatto si hanno le condizioni per cui $v_f \approx v_m$ ovvero la velocità frontale è simile alla velocità media di attraversamento del filtro, cosa che non vale per filtri *pleated* (pieghettati) o a tasche in cui $v_m < v_f$. I meccanismi per cui il particolato non attraversa la sezione sono multipli e dipendono dal diametro:

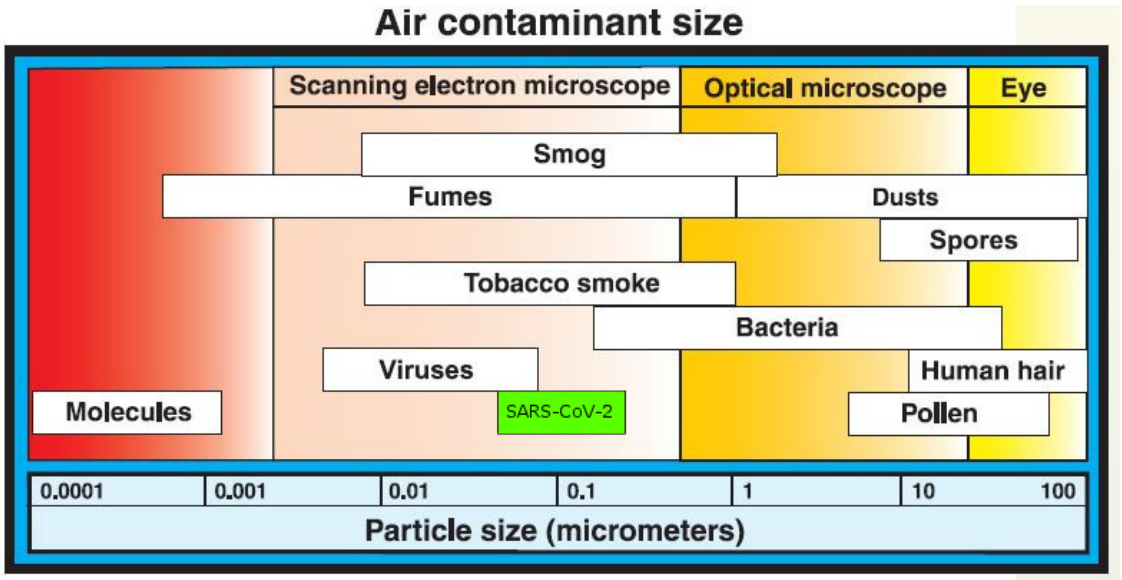



Figura 2.11: Dimensioni degli inquinanti più comuni in ambiente. Immagine modificata da [42]

1. Impatto inerziale: l'aria assume una traiettoria a curve strette e l'inerzia delle particelle sospese le fa invece impattare con le fibre

2. Intercettazione: la dimensione delle particelle fà sì che questa non passino attraverso fibre troppo vicine tra di loro

3. Diffusione: le particelle più piccole sono sottoposte ad un moto random definito *Browniano*. Questo può portarle a entrare in contatto con una fibra

4. Attrazione elettrostatica: la carica differente tra particella sospesa e fibra può generare una piccola forza attrattiva che ne devia il corso e la fa rimanere attaccata. Questo ultimo meccanismo gioca un ruolo secondario nella filtrazione meccanica

Si può dunque chiaramente capire come questi diversi meccanismi entrano in gioco per particelle sospese con diametro differente. Nello specifico diametri molto piccoli saranno più suscettibili al punto 3, mentre quelli più grandi a 1 e 2. Nel contesto della pandemia da SARS-CoV-2 vediamo come il campo di esistenza del virus rientra, purtroppo, nella zona di minor capacità dei sistemi di filtraggio meccanici standard.
I parametri di maggiore importanza sono: efficienza di raccolta, salto di pressione e capacità di trattenimento particolato. Nei filtri meccanici i primi due risultano essere direttamente proporzionali, infatti tanto maggiore è il $\Delta p$ tanto migliore sarà il filtraggio. Ciò va considerato nel contesto di un impianto poiché la nascita

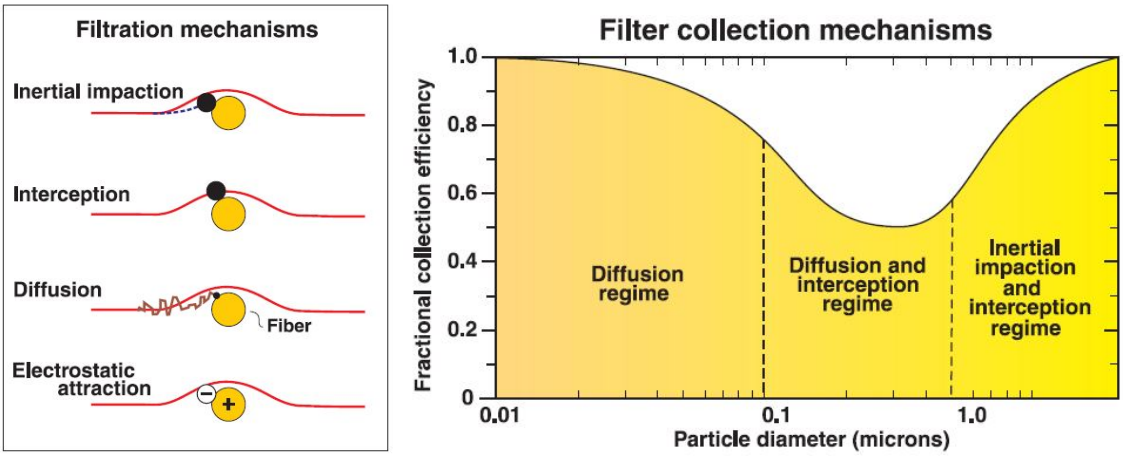



Figura 2.12: Metodi di filtrazione e range di efficacia. Immagine da [42]

di una perdita di carico troppo elevata potrebbe dare origine a bypass che, come già detto, invalidano completamente la sezione. Altre tipologie di filtri come quelli elettrostatici, che utilizzano piastre caricate elettrostaticamente per attirare a sè gli inquinanti hanno invece dei salti di pressioni costanti nel tempo e poco significativi, ma l'efficacia si riduce col tempo per via del fatto che la capacità di trattenimento decresce (il filtro "si riempe"). Lo standard ASHRAE valuta questi tre parametri tramite l'indice `MERV` (*Minimum Efficiency Reporting Value*) compreso tra 1 e 20, dove i `MERV` 1 sono a bassissima efficienza mentre i `MERV` 20 sono i filtri assoluti (anche chiamati `HEPA` - *High Efficiency Particulate Air* con efficienze fino al 99.9%).
Prima di sostituire una vecchia sezione di filtraggio o installarne una nuova è imperativo capire il tipo di problema che si deve affrontare, in quanto queste componenti sono di fondamentale importanza in molti impianti di ventilazione:

- Il primo passo è valutare il tipo di particella sul quale desidero agire e capire appieno la differenza tra i tipi di filtri, con i rispettivi vantaggi e svantaggi.
  Si valutino a fondo dunque **la scelta**, **l'installazione** e **le condizioni operative**.

- Segue l'analisi dei costi che deve includere non solo l'opzione dell'installazione di una nuova completa sezione di filtraggio, ma anche l'alternativa di un *update* alla vecchia. Questi includono l'investimento iniziale (i filtri meccanici tendono ad essere più costosi di quelli elettrostatici, ma hanno un periodo di funzionamento più lungo) e i costi di gestione. Tra questi il più importante risulta essere la potenza elettrica richiesta al ventilatore. È anche valutabile l'opzione dell'acquisto di un pre-filtro che ne allunghi ulteriormente la vita utile.
  Riassumendo i principali esborsi di denaro sono **l'acquisto**, **il mantenimento** e **la sostituzione finale**.

- Infine la manutenzione periodica deve essere conforme alla tipologia di filtro acquistato: infatti la velocità frontale dell'aria ha un forte impatto sull'efficienza e deve essere accuratamente monitorata.
  Si enfatizza dunque l'importanza del **controllo** e **manutenzione periodica**.

### 2.4.5 La questione della filtrazione: i protocolli

L'ASHRAE ha scritto nei suoi documenti [43,44] ampiamente riguardo il ruolo della filtrazione e come questa può combattere la diffusione del contagio. Si elencano di seguito le tipologie di filtrazione ivi indicate:

1. **Filtri Meccanici**
   Come spiegati nella sottosezione precedente possono sensibilmente ridurre la concentrazione di aerosol negli ambienti purché siano installati correttamente. Hanno dimostrato di avere un modesto contributo positivo sulla salute respiratoria degli occupanti. Rimuovono gli inquinanti, ma non li inattivano. Vanno dunque prese misure preventive speciali nella manutenzione. La loro presenza è estremamente evidente nella concentrazione di particolato in ambiente. Per massimizzare l'efficienza vanno montati sulla presa di aria esterna, sul ricircolo e prima della mandata in ambiente.

2. **Filtri HEPA (assoluti)**
   Tali componenti hanno efficienze di rimozione di inquinanti estremamente elevate, ma non sono tendenzialmente adatti ad essere installati retroattivamente su impianti già in funzione. Possono essere introdotti in ambiente come dispositivi portatili o indossabili.

3. **Filtri elettronici ed elettrostatici**
   Hanno un range di efficienze molto ampio e devono essere studiati dunque caso per caso. L'efficacia dipende dalla frequenza di pulizia in quanto gli inquinanti si accumulano sulle piastre. Valgono approssimativamente tutte le considerazioni fatte per i filtri meccanici.

4. **Sorbenti e *Gas-Phase Air Cleaners***
   Questa tipologia di filtraggio spesso presente negli impianti di ventilazione ha lo scopo di ridurre la concentrazione di ozono, composti organici volatili, odori e vapori e sono del tutto inutili contro i virus.

5. **PCO - *Photocatalytic Oxidazation***
   Questa tipologia di filtraggio innovativa fa uso di processi chimici indotti dall'esposizione con radiazione elettromagnetica. La tecnologia è recente e gli studi sugli effetti sulla salute degli occupanti sono ridotti. Si rischia la produzione di ozono tossico.

6. **Radiazione elettromagnetica ultravioletta germicida UVGI**
   Come già evidenziato in 1.3.5 sono presenti in commercio dei sistemi a radiazione ultravioletta UV-C. Nonostante questi non possano essere propriamente denominati "di filtraggio", poiché non *catturano*, ma *inattivano*, vengono comunque introdotti in questa sezione in quanto il risultato che si ottiene è identico. È una soluzione rischiosa per gli effetti negativi che l'applicazione e l'installazione errata possono comportare. Si può pensare all'applicazione nelle condotte, direttamente in ambiente (verso il soffitto) e portatili. L'efficacia dipende fortemente dal periodo di tempo a cui il patogeno è sottoposto alla radiazione (andrebbero dunque installate in condotte lunghe e dritte). Il massimo effetto si ha in compresenza di altre tipologie di filtri, mentre l'installazione semplice in condotte non adatte o in posizioni mal scelte non sembra apportare alcun beneficio.

7. **Ozono** $O_3$
   L'immissione in ambiente di ozono per mezzo di *ozone generating air-cleaning devices* è estremamente efficace per la rimozione di qualsiasi inquinante, ma presenta dei pericoli per la salute degli occupanti. Non andrebbe mai utilizzato in spazi chiusi sebbene la regolamentazione a riguardo sia ancora un po' carente. In genere per concentrazioni con tassi di nocività bassi per l'uomo questo non riesce ad apportare alcuna miglioria sensibile.

8. **Ventilazione come soluzione alla contaminazione per diluizione**
   Questo punto è già stato trattato in numerosi capitoli precedenti e prevede l'aumento di portata di aria esterna per la diluizione di inquinanti in ambiente. È infatti vero che l'efficienza di filtrazione di *inquinanti indoor* è frequentemente espressa come "ricambi orari equivalenti", ovvero la quantità d'aria esterna che avrebbe portato la stessa concentrazione in ambiente. Allo stesso tempo una ventilazione meccanica eccessiva potrebbe avere la conseguenza di sostituirli con *inquinanti outdoor*, il che assume un'importanza non secondaria laddove la qualità dell'ambiente esterno non è elevata. Secondo i principi dell'`IAQ` la filtrazione può quindi sostituire solamente una quota parte di aria esterna. Nel caso del SARS-CoV-2 questo metodo è estremamente *efficace* (altissima riduzione di patogeno in sospensione), ma poco *efficiente* (dal punto di vista energetico e dei consumi).

9. **Altri metodi**
   Questi includono tecnologie emergenti per le quali si hanno ancora pochi dati comprovati:

   - Il processo di *Bipolar Ionization* per il quale i virus reagiscono con una fonte di ioni

- L'introduzione di disinfettanti chimici (dove i rischi sono rappresentati dall'uso improprio e dalla mancata lettura adeguata delle controindicazioni),

- La `VHP` (*Vaporized Hydrogen Peroxide*) dove un composto di perossido di idrogeno è espulso nell'ambiente (rigorosamente non occupato) o nelle condotte e sanifica le superfici

- La `P-UV` che sta per *Pulsed UV* e che prevede l'utilizzo di una luce a Xenon pulsante. Racchiude in sè tutte i vantaggi della UVGI con una maggiore efficacia a fronte di un investimento iniziale più elevato

- Luce `Far UV` e `Near UV`, applicazioni di UVGI a lunghezze d'onda maggiori o minori dei $265nm$ standard

In conclusione la posizione di ASHRAE a riguardo dice che i processi di filtrazione dell'aria potrebbero migliorare la situazione del contagio, ma ciò non è ancora comprovato sperimentalmente. In ogni caso una buona manutenzione delle sezioni di filtri può avere effetti solamente secondari nella diffusione (non possono dunque sostituire la più importante ventilazione meccanica forzata nonché il comportamento igienico corretto degli occupanti) e sono necessari giudizio ed esperienza professionale per raggiungere compromessi e soluzioni adeguati alle situazioni di pandemia. Le tecnologie più efficaci risultano sempre quelle più studiate e dunque filtri meccanici, elettronici o elettrostatici e UVGI, mentre le tecnologie emergenti potranno in futuro rappresentare un punto di ragionamento. Si consiglia dunque una pulizia e una frequenza di manutenzione più elevata, ma non operare sostituzioni di filtri vecchi con nuovi più performanti o assoluti in quanto potrebbero far nascere una cascata di altri problemi e conseguenze sull'impianto. Negli impianti comuni le sezioni di filtraggio non risultano comunque essere sufficienti a prevenire da per sé il contagio e si suggerisce dunque di dare priorità ad altri interventi di cui alle sezioni 2.3.1 e 2.4.2.

## 2.5 Altri enti e protocolli

Gli enti e associazioni che hanno prodotto documentazione tecnica e prontuari per la gestione degli impianti di ventilazione e climatizzazione durante la pandemia da COVID-19 sono molteplici. Si intende presentare ora alcuni esempi più rappresentativi di tematiche ancora non affrontate, sebbene si voglia evitare di continuare a ripetere le stesse indicazioni su cui la totalità della comunità scientifica è di comune accordo.

### 2.5.1 I protocolli REHVA: una posizione più conservativa

La REHVA (*Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning*) viene fondata nel 1963 ed è una *umbrella organization*, ovvero un'associazione di istituzioni che lavorano insieme formalmente per produrre documenti e garantire coordinazione, risorse, rappresentazione e riconoscimento a realtà più piccole diffuse sul territorio[3]. Unisce più di 120.000 progettisti, ingegneri, tecnici ed esperti HVAC in 27 paesi europei (tra cui l'Italia per cui si fa riferimento alla AICARR già presentata in 2.3) e fornisce una rete internazionale per lo scambio di conoscenze professionali allo scopo di migliorare la salute, il comfort, la sicurezza nonché l'efficienza energetica negli edifici[4].
I tre documenti pubblicati da REHVA il 17 Marzo 2020, il 3 Aprile 2020 e il 3 Agosto 2020 [4, 45, 46] sono rappresentativi dello stato di allerta e della necessità di interventi perentori e di celere applicazione delle prime fasi della pandemia dove si riteneva fosse più importante la limitazione del contagio piuttosto che l'efficienza energetica e (in minima parte) il comfort termico. L'ultimo di Agosto presenta alcuni piccoli cambiamenti rispetto ai due precedenti, ma la posizione di REHVA anche sulle questioni più delicate e controverse, non pare essere cambiata coi mesi anche a seguito di maggiori conoscenze del patogeno e delle sue vie di trasmissione, sempre basandosi sul principio ferreo della ALARP (*As Low As Reasonably Possible*).
La rappresentazione riportata in 2.13 racchiude in sè i vari suggerimenti proposti. Se ne segue dunque la numerazione:

1) Aumentare la portata di ventilazione esterna è un punto in cui tutti paiono concordare. Le normative suggeriscono i valori di portata per metratura quadra e per occupazione (se la prima non può essere variata, la seconda sì). È dunque consigliato ridurre la concentrazione di persone e distribuirle in maniera accorta nei vari ambienti

2) 3) Il funzionamento deve essere garantito almeno 2 ore prima e dopo l'occupazione dell'ambiente. Non si spengano gli impianti durante i weekend né la notte, ma si mantenga una potenza di ventilazione minore. Anche negli ambienti più abbandonati a causa della pandemia spegnare completamente l'impianto è sconsigliato

4) Si consiglia l'apertura costante delle finestre, anche a costo di un minimo calo nel comfort termico. La questione sulla quantità di rinnovo di aria esterna tramite i serramenti è aperta e il valore numerico della portata entrante può essere stimato secondo la norma UNI 16798-7. Negli ambienti in pressione questo può favorire la fuoriuscita di patogeno in sospensione, ma non deve

[3] Da Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Umbrella_organization

[4] Dal sito ufficiale REHVA: https://www.rehva.eu/about-us/who-we-are/about-rehva

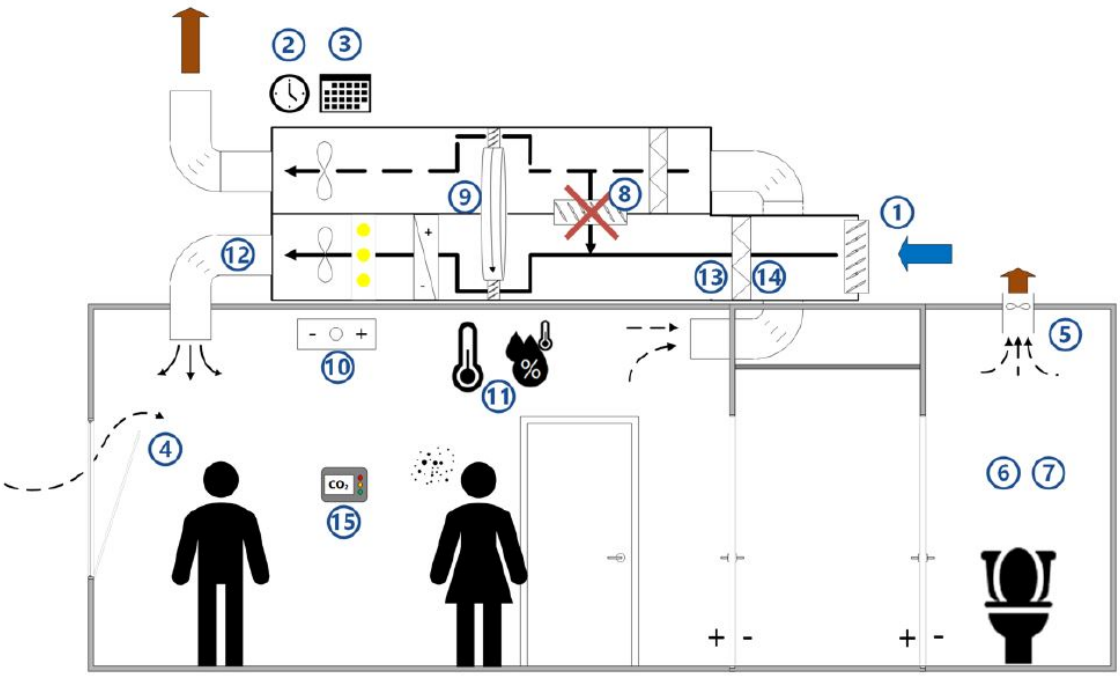



Figura 2.13: Interventi proposti da REHVA. Immagine da [46]

.

essere considerato un metodo affidabile da per sé. Infatti non viene introdotta tramite serramenti una portata sufficiente al lavaggio delle stanze. Nei bagni la situazione non è favorevole in quanto l'apertura di finestre in ambienti in depressione potrebbe mettere in comunicazione i bagni con altri ambienti, non solo inducendo un *backflow* di bioaerosol, ma anche generando discomfort per odori e inquinanti

5) 6) 7) Nei bagni l'operazione di estrazione d'aria deve essere mantenuta attiva per ventiquattr'ore al giorno, sette giorni su sette. Si indichi di scaricare con il coperchio del servizio igienico chiuso.

8) Si imposti l'impianto per lavorare a 100% di aria esterna. Si chiudano dunque tutte le serrande di ricircolo anche in presenza di sezioni di filtraggio (solo l'efficienza HEPA può rimuovere efficacemente il patogeno dal flusso)

9) Si ispezionino accuratamente le sezioni di recupero del calore (specie gli scambiatori rotativi). Se sono montati correttamente e le infiltrazioni sono monitorate e tenute sotto un valore massimo non rappresentano un problema e non aumentano il rischio di contagio

10) Per gli impianti a ricircolo locale di aria si consiglia il funzionamento in continuo (ad una potenza minore se la stanza non è occupata). Laddove questi

siano accoppiati ad un impianto ad aria primaria valgono le indicazioni per le unità di trattamento aria. In ogni caso si vogliano aprire sempre le finestre per incrementare l'apporto di aria esterna. È anche consigliato il monitoraggio della $CO_2$ in ambiente per controllare che la portata sia sufficiente

11) Secondo la REHVA l'umidità e la temperatura non hanno effetti concreti sul rischio da contagio per il SARS-CoV-2, nel range che consente di garantire anche un comfort termoigrometrico agli occupanti. Di conseguenza si invita a non apportare drastici cambiamenti ai valori impostati anche qualora questi siano medio-bassi (25%-30% nei casi di sistemi con umidificazione centralizzata)

12) La pulizia e disinfezione delle condotte non ha effetti pratici rilevanti. Si prevede infatti che il sistema di ventilazione non possa essere esso stesso una fonte di contagio in quanto il patogeno non riesce a depositarsi sulle superfici dei condotti se sottoposto ad un flusso d'aria di entità pari a quelli che generalmente percorrono gli impianti. Si consiglia dunque di effettuare manutenzione secondo le modalità e tempistiche indicate da prima della pandemia, senza preoccuparsi di aggiungerne di straordinarie

13) 14) Operazioni di sostituzione dei filtri non sono necessarie. Qualora vi sia una minima concentrazione di patogeno nell'aria esterna (per una disposizione scorretta degli *inlet* e *outlet*) le sezioni già presenti sono in grado di rimuoverla. I problemi legati ad eventuali sostituzioni sono già stati affrontati in 2.4.5. Anche per questo aspetto non è necessaria manutenzione straordinaria

15) Per quanto riguarda la sensoristica presente in ambiente, questa dovrebbe essere tarata nel contesto dello stato di emergenza pandemica. Si suggerisce dunque di abbassare i valori di allarme della $CO_2$ e altri inquinanti (ad esempio a 800ppm) per agire prontamente in caso di problemi ai servizi di ventilazione

### 2.5.2 I protocolli BESA: gli impianti a ricircolo locale

Fondata nel 1904, l'organizzazione dei membri `BESA` (*Building Engineering Services Association*) è la principale fonte di risorse HVAC del Regno Unito. Lo scopo primario è il miglioramento e il supporto degli esperti e dei tecnici membri attivi nella progettazione, installazione, gestione, manutenzione e controllo degli impianti di ventilazione e climatizzazione negli edifici[5].
Il documento prodotto dall'associazione BESA in data `1 Luglio 2020` [47] ricalca nella maggior parte la posizione della REHVA [45], di cui infatti è un'integrazione, ma apporta piccole modifiche ad alcuni punti.

[5]Dal sito ufficiale BESA: https://www.thebesa.com/about-us/

- Viene suggerito un valore molto inferiore di limite per i controlli della $CO_2$ in ambiente fino anche a 400ppm. Questo poiché è fondamentale accorgersi immediatamente se un sistema di ventilazione dovesse smettere di funzionare oppure non fosse sufficientemente potente

- È possibile introdurre delle sezioni che regolano le pressioni a valle e monte dei recuperatori rotativi. Ciò potrebbe permettere di mantenere lo scambiatore attivo con un ragionevole valore di infiltrazioni

- Come anche la REHVA viene suggerita la totale rimozione della quota di ricircolo in ambiente. È fatto esplicito riferimento al fatto che i vantaggi in senso di rischio di contagio hanno un peso maggiore rispetto al lato dei consumi energetici

- Un secondo motivo per cui la pulizia straordinaria delle condotte non è necessaria è l'inattivazione delle cariche virali depositate sulla superficie col passare del tempo. Ciò significa che se del materiale patogeno è effettivamente entrato nei sistemi di ventilazione prima del *lockdown* e si è depositato, la probabilità che questo venga risollevato e abbia una potenzialità infettiva a giorni di distanza (oppure dopo il periodo di quarantena) è estremamente ridotta

- La sostituzione e manutenzione dei filtri deve essere effettuata tenendo presente che è possibile entrare in contatto con cariche virali attive. Ciò significa che la procedura va svolta a impianto spento e i tecnici devono rispettare gli standard di sicurezza per contaminazione biologica (indossare guanti e protezioni respiratoria e disporre del materiale di scarto in apposite sacche a chiusura ermetica)

Il documento in analisi si dilunga invece, più del prontuario REHVA, sulla questione degli impianti a *Fan Coil* e ricircolo locale. Nello specifico il documento si pone tre obiettivi:

(a) la massimizzazione della portata d'aria esterna immessa

(b) la riduzione della cosiddetta *cross contamination*, ovvero il trasporto di patogeno attivo sospeso tra ambienti diversi

(c) la limitazione della velocità dell'aria in ambiente per permettere al SARS-CoV-2 di essere "catturato" dai flussi principali ed espulso (ridurre il raggio di distribuzione)

Viene dunque messa in discussione la possibilità di tenere l'elemento acceso o meno a seconda della sua priorità di utilizzo, nonché da alcuni studi riportati in forma di *flow chart* in figura 2.14.

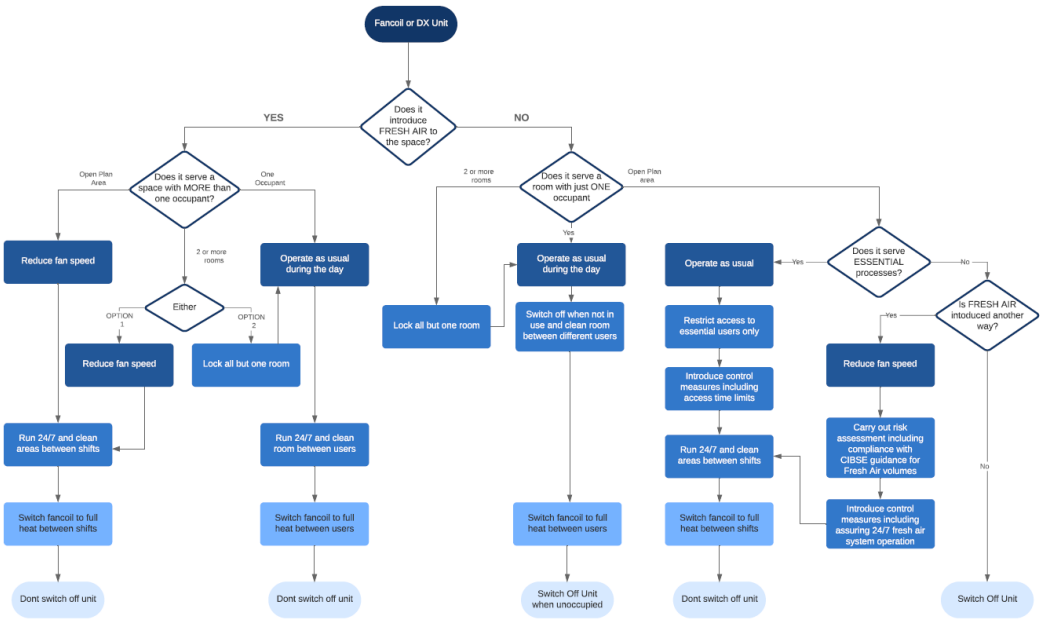



Figura 2.14: *Flow chart* per i protocolli sui *Fan Coil*. Immagine da [47]

- Il fan coil asserve un locale in cui è presente (per la maggior parte del tempo) un'unica persona, ad esempio un ufficio singolo. In questo caso non si hanno problemi a tenerlo acceso in quanto il rischio si distribuirebbe solo sul presente
- Per quegli ambienti con un'occupazione di più persone, nei quali non è possibile garantire un flusso d'aria esterna sufficiente è consigliabile spegnere i ventilconvettori onde evitare una distribuzione non omogenea di cariche virali in ambiente
- Laddove l'ambiente è rivolto a più persone e l'impianto a ricircolo locale non può essere spento (per una serie di ragioni) oppure l'apporto di aria esterna è adatto, andrebbe comunque posta attenzione alla posizione degli occupanti e la velocità andrebbe ridotta al minimo per evitare ri-sollevamenti

Altre indicazioni:

- È possibile inattivare i virus depositatosi sulla superficie degli scambiatori di calore all'interno dell'elemento mettendolo in funzione alla massima potenza termica disponibile (in riscaldamento) se questa raggiunge determinati requisiti minimi (ad esempio la temperatura di 60°C)
- Laddove i fan coil non possano essere spenti questi andrebbero mantenuti in funzionamento continuo alla minima velocità per evitare depositi di patogeno sulle superfici

- Come già indicato, i filtri inseriti all'interno dei terminali non hanno, generalmente, le prestazioni adeguate per catturare particelle del diametro del SARS-CoV-2 e la sostituzione con un componente che potrebbe riuscirvi comporta una cascata di problemi secondari che tendenzialmente non ne giustificano la validità

### 2.5.3 I rapporti ISS: la velocità dell'aria in ambiente

Il rapporto ISS del `25 Maggio 2020` è uno dei documenti più estensivi riguardo la gestione degli impianti di ventilazione e climatizzazione durante la pandemia e ricalca le posizioni più stringenti di REHVA e BESA. Per evitare di appesantire il testo con ripetizioni si tratta in questa piccola sottosezione di un argomento che viene descritto bene in [3, 48]: la questione della velocità dell'aria in ambiente.
Sebbene questa problematica verrà ripresa nell'ultima parte, già dalla letteratura è chiaro come la distribuzione dei moti dell'aria in ambiente possa avere un forte impatto nei percorsi delle goccioline di aerosol infetto attraverso le stanze. Nei protocolli BESA e anche in altri testi in precedenza viene consigliato, laddove i terminali debbano essere tenuti accesi, di farli funzionare alla velocità minima onde evitare ri-sollevamenti pericolosi. Inoltre è plausibile l'interazione dei getti d'aria emessi da spilt o termo-ventilconvettori con le emissioni dovute alla respirazione, parlato o altra attività in corso. Il conseguente trasporto di materiale infetto potrebbe conseguire al contagio di soggetti suscettibili per modalità airborne o anche per semplice contagio diretto, qualora le velocità siano tali da consentire il movimento di *droplets* anche pesanti. L'entità di tale meccanismo di diffusione dipende in prima battuta dal diametro della particella in sospensione, ma anche dall'entità della distribuzione delle velocità, come chiaramente deducibile dalla figura 2.15. L'immagine è divisa in alcuni quadranti: il diametro massimo per la formazione di aerosol è preso pari a $100\mu m$ sebbene questo paia di gran lunga eccessivo. La distinzione fra *droplets* pesanti e leggere avviene intorno ai $10\mu m$. Ciò non esclude però che particelle emesse di dimensioni superiori possano effettivamente essere sottoposte al processo di *disseccazione* come spiegato in 1.3.2. Per quanto riguarda le ordinate, che riportano il rapporto tra trasporto aereo e forza di gravità, si fa riferimento all'unità, al di sopra della quale il primo meccanismo diventa più importante del secondo, e la decina, al di sopra della quale è possibile trascurare le forze volumiche gravitazionali e considerare il patogeno completamente airborne. È importante dunque capire come forti velocità dell'aria impattino anche la trasmissione aerea, favorendola a dispetto della dimensione delle goccioline emesse. Nello specifico il documento evidenzia due velocità significative:

- $v = 0.25\ m/s$: massima consentita per l'interazione delle *droplets* con diametro di $100\mu m$ con il getto d'aria proveniente dai terminali. Questa non causa vero e proprio trasporto di materiale infetto in ambiente, ma aumenta il raggio di

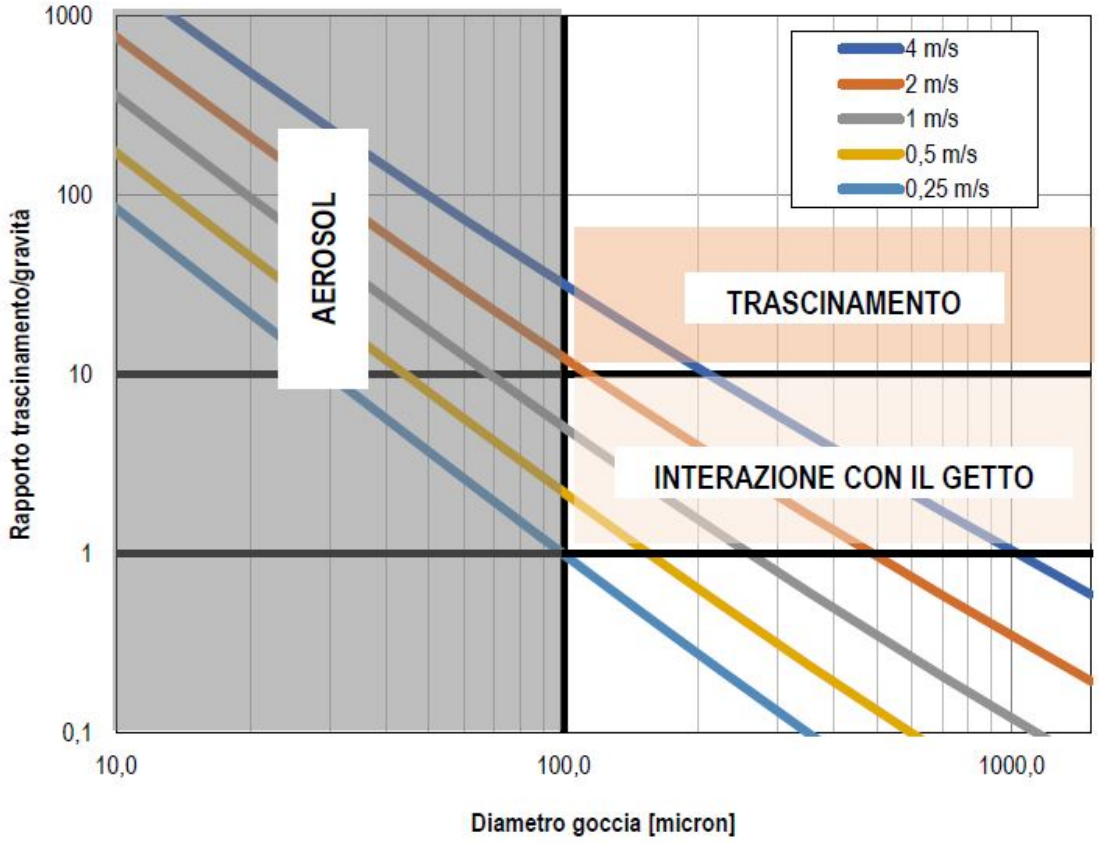


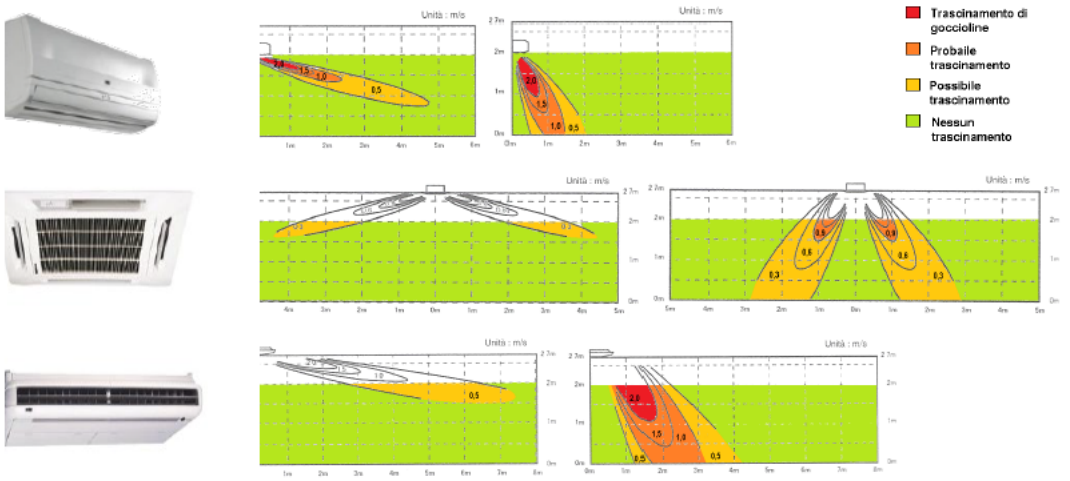

Figura 2.15: Interazione getti d'aria e *droplets*: rapporto forze di trascinamento e gravità a diverse velocità. Immagine da [3]

distribuzione di cariche virali intorno alla persona infetta, riducendo di fatto l'efficacia del distanziamento sociale interpersonale

- $v = 2\ m/s$: massima consentita per evitare il trasporto di materiale infetto in ambiente, anche per goccioline di diametro di $100\mu m$. In questa situazione estrema si ha una componente airborne troppo elevata e gli interventi atti a ridurla sono di necessità impellente

L'importanza della determinazione della distribuzione delle velocità è legata all'utilizzo dell'ambiente stesso e al posizionamento dei terminali. Questi possono in alcune situazioni imporre un moto con $v \geq 2\ m/s$, ma tendenzialmente molto localizzato: infatti qualora la condizione di trascinamento sia rispettata solo in zone dell'ambiente che non sono interessate da presenza di *droplets*, questa può anche favorire i meccanismi di diluizione ed essere (parzialmente) positivo. È infine importante definire le modalità di occupazione degli ambienti: infatti, come già descritto nella sezione dedicata alla BESA, laddove si stia trattando di un ufficio singolo

tali considerazioni perdono di valore e si voglia sempre mettere al primo posto il comfort termico dell'occupante.




| Modalità d'uso dell'ambiente | Rischio associato | Interazione con l'impianto di climatizzazione |
|---|---|---|
| Ambiente occupato da un singolo utente, in via esclusiva | Nessuno | Nessuna |
| Ambiente occupato da **diversi utenti**, seppure non contemporaneamente *(es. sala copie, sala ristoro con accesso di un solo utente per volta, turnazioni in aree ufficio)* | Diffusione per presenza differita | Il trascinamento può prolungare il periodo di sospensione delle gocce |
| Ambiente occupato da più utenti o da un singolo utente in via prevalente, con sporadici accessi di altri utenti *(es. una segreteria)* | Diffusione per presenza contemporanea | L'incremento della gittata delle goccioline e la dispersione dell'aerosol possono favorire la diffusione tra le diverse parti dell'ambiente |

Figura 2.16: Tipica distribuzione di velocità per alcuni diffusori più comuni e tabella importanza interazione getto. Immagine da [3]

## 2.6 Riepilogo

Per evitare di appesantire il testo con l'analisi di tanta altra documentazione tecnica prodotta in questo periodo di pandemia così prolifico per la comunità scientifica si vuole presentare un riassunto generale delle posizioni riguardo gli interventi principali e la loro efficacia sotto forma di tabella. Si vuole anche evidenziare come l'andamento delle conoscenze si sia modificato nel tempo tramite l'inserimento di alcuni riferimenti temporali. Per quanto concerne le conclusioni e i ragionamenti a valle di tutto questo studio si fà riferimento al prossimo capitolo, dove verranno

analizzate alcune procedure effettivamente svolte sul campo ed evidenziati punti di forza e debolezza, nonché presentate eventuali alternative migliori o più complete.

| | AICARR 13 Marzo | AICARR Luglio 2020 | ASHRAE | REHVA 17 Marzo | REHVA 3 Agosto | BESA | ISS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Aumento portata aria esterna** | Aumentare mandata e ripresa | Areare l'ambiente in modo uniforme per diluire | Aumentare la *outdoor ventilation* | Incremento portata ventilazione | Tanta aria esterna quanta possibile | Tanta aria esterna quanta possibile | Massima aria esterna |
| **Forzatura serranda di ricircolo in sola aria esterna** | Consigliato nessun ricircolo Attenzione al punto del ventilatore | Può essere aperto se i costi sono eccessivi e con buon filtraggio | Consigliato 100% aria esterna | Evitare il ricircolo | Evitare il ricircolo | Evitare il ricircolo | Escludere il ricircolo |
| **Bypass recuperatore di calore** | Vanno sempre arrestati | Va valutato caso per caso (flow chart) | Studio delle pressioni a monte e valle per infiltrazioni | Spegnere se sospette infiltrazioni | Acceso se installato in modo corretto (pressioni) | Acceso se installato in modo corretto (pressioni) | Consigliato escluderli |
| **Modifica *setpoint* umidità** | Al di sopra del 40% | Al di sopra del 40% | Tra il 40% e il 60% | Nessun effetto pratico | Nessun effetto pratico | Nessun effetto pratico | Circa il 60% |
| **Funzionamento in continuo** | Continuo su base giornaliera | Va valutato caso per caso | Servono 3 ricambi d'aria equivalenti. Tenere acceso l'impianto 2 ore prima e dopo | 2 ore prima e dopo. Meglio tutto il giorno (a portata ridotta) | Impianto acceso 24/7 a portate ridotte | Impianto acceso 24/7 a portate ridotte | Impianto acceso 24/7 a portate ridotte o 2 ore prima e dopo. |
| **Impianti a tutt'aria e aria primaria** | Velocità e portate nominali massime | Fare attenzione agli impianti multizona | | Utilizzo di *room air cleaners* se necessari | Utilizzo di *room air cleaners* se necessari | Utilizzo di *room air cleaners* se necessari | Ricircolo a tenuta nei multizona |

*continua a pagina seguente*

| | *continuo da pagina precedente* | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | AICARR 13 Marzo | AICARR Luglio 2020 | ASHRAE | REHVA 17 Marzo | REHVA 3 Agosto | BESA | ISS |
| **Impianti a ricircolo locale *Fan Coil* o *Split*** | | Accesi al minimo se importanti per il comfort Piccoli effetti positivi | Ispezione preliminare dei terminali | Consigliato spegnere terminali. In alternativa accurata disinfezione | Accesi in continuo a velocità minima e con finestre aperte | Va valutato caso per caso (flow chart) | Se in funzione tenere porte chiuse (*cross contamination*) |
| **Strategie pulizia e manutenzioni straordinarie** | Non necessari | Aumento frequenza interventi | Necessari solo in situazioni critiche | Nessun effetto pratico | Nessun effetto pratico | Nessun effetto pratico | Aumentare frequenza interventi |
| **Posizione sulla filtrazione** | Riduce il rischio | Gli HEPA annullano il rischio. Gli altri lo riducono | Inserire filtri migliori se fattibile (MERV 14) | Sostituzione filtri non necessaria | Sostituzione filtri non necessaria | Sostituzione filtri non necessaria | Sostituire filtri vicini a fine vita utile con più efficienti |
| **Apertura serramenti** | | Tenere le finestre aperte non sostituisce la ventilazione meccanica | Tenere aperto per due ore prima dell'occupazione | Aprire sempre finestre quando possibile | Aprire sempre finestre quando possibile | Aprire sempre finestre quando possibile | È più importante il comfort (stress per DPI) |
| **Velocità dell'aria in ambiente** | | $0.12 \div 0.17$ $m/s$ nella zona occupata | | | | | Occupante infetto: basso rischio $v \leq 2$ $m/s$ alto rischio $v \leq 0.5$ $m/s$ |

Tabella 2.1: Riepilogo protocolli per gli impianti di ventilazione e climatizzazione

# Capitolo 3

# Le aule del Politecnico

## 3.1 Procedure operative e parametri d'interesse

Quanto studiato fino ad ora, nei primi due capitoli, è quanto precede l'applicazione effettiva dei protocolli per gli impianti di ventilazione e climatizzazione dei grandi ambienti. L'analisi dei pro e i contro e la ponderazione accurata delle conseguenze che ogni intervento provoca all'atto pratico risulta fondamentale nell'elaborazione di una strategia specifica che favorisca la limitazione del contagio in ciascun contesto. Sono inoltre necessarie valutazioni di tipo generale sullo stato dei macchinari e del sistema a monte di opportune modifiche, per prendere in considerazione anche la possibilità che alcuni ambienti possano venire temporaneamente interdetti all'utilizzo. Infatti, i protocolli trattano unicamente quegli ambienti dove è imperativa la presenza di personale al loro interno e lo stato degli impianti è buono, poiché è chiaro come, se la situazione fosse intrinsecamente troppo grave, la prima soluzione e la più efficace sarebbe senz'altro impedire l'ingresso nella stanza. Se nelle palazzine uffici di piccole o medie aziende, ciò può risultare impossibile, nel contesto di grandi università quale il Politecnico di Torino, l'opzione è tutt'altro che da scartare, alla luce della comprovata efficacia della didattica a distanza online (`DAD`). Si vuole ora indicare quanto è stato proposto come procedura di controllo dello stato delle UTA, evidenziarne i punti di forza e le criticità, valutarne l'efficacia e effettuare un confronto con quanto suggerito dagli enti regolanti.

### 3.1.1 Le UTA del Politecnico

Si voglia inizialmente descrivere brevemente le varie sezioni di un'unità di trattamento aria tipica, presente a servizio delle aule della sede centrale di Corso Duca e si procede con lo studio della figura proposta 3.1, macchinario che asserve una delle quattro aule della ex-centrale termica del Politecnico. Questa è solamente portata come esempio: infatti ogni aula ha associata un'unità di trattamento aria propria (solo alcune hanno degli impianti *multizona*) simili, ma non identiche. Infine questa

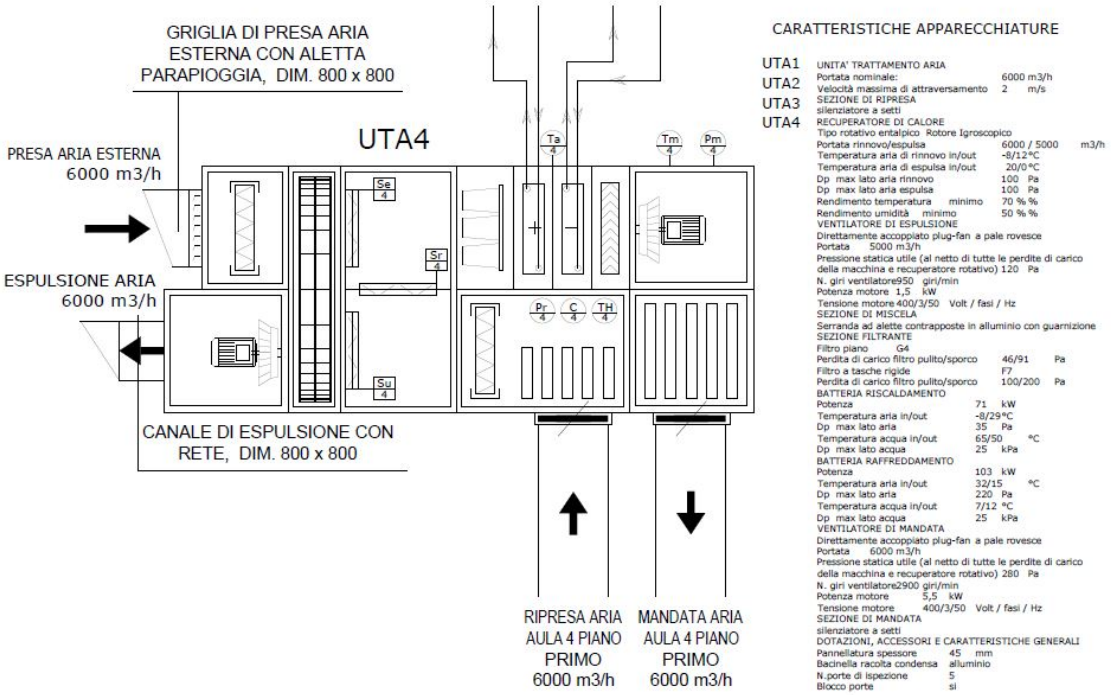



Figura 3.1: Schema funzionale di una UTA del Politecnico

UTA è di recente costruzione (rispetto ad altre della sede centrale) e presenta tutte le sezioni di cui si è ampiamente discusso alla parte precedente. Nello specifico (seguendo il percorso dell'aria trattata):

- Viene rappresentata graficamente la presa di aria esterna con conseguente parapioggia. È indicata la portata nominale di aria che in condizioni ideali la attraverserebbe e viene riportato il fatto che in quel punto è presente una griglia medio fine che dà inizio ad un filtraggio molto grossolano di elementi esterni. Questa macchina è posizionata all'interno di un locale tecnico sul tetto dell'edificio e la presa d'aria esterna è facilmente raggiungibile da roditori e volatili. Ci si rifà alla figura 3.2. Si può chiaramente vedere come le griglie di mandata ed espulsione sono poste lontane tra di loro onde evitare il corto circuito di aria in uscita. Tale configurazione è una premessa degli studi che seguono e dei protocolli che precedono, in quanto si prevede sempre (come già più volte ripetuto) che l'aria esterna sia priva di carica virale attiva. Ciò perderebbe di validità qualora parte della portata in uscita dovesse malauguratamente rientrare dalla mandata (si verrebbe a creare una sorta di ricircolo naturale). Allo stesso modo all'interno degli ambienti

- La prima sezione è un filtro pieghettato che dà un primo approccio al filtraggio. Questo è molto grossolano e trattiene solo le particelle di polvere o gli inquinanti esterni più grandi che potrebbero portare problemi alla sezione di recupero del calore. Questo è rappresentato in maniera molto esplicativa con una spezzata a zig-zag

- Una delle parti più importanti, ed uno dei motivi per cui è stato scelto questo tra i numerosi macchinari dell'università, è la presenza della sezione di recupero del calore per mezzo di scambiatore rotativo entalpico. Questo viene rappresentato in maniera molto chiara con un disegno della ruota stessa che abbraccia sia la parte alta di mandata, che quella bassa di ritorno. È necessaria la presenza di piccoli pre-filtri come già spiegato al punto precedente. L'importanza di questa sezione può essere letta nella prima parte ai capitoli 2.3.3 e 2.4.3. Con riferimento specifico alla seconda possiamo notare come l'*arrangement* seguito sia il numero 1 in quanto l'aria attraversa il recuperatore prima di essere accelerata da un ventilatore sia in mandata che in ritorno. Segue che va effettuato uno studio sulle infiltrazioni e sulle pressioni a valle e monte, oppure lo scambiatore va fermato

- Segue un'altra importante sezione discussa più volte ai precedenti capitoli (2.3.1 e 2.4.3) ovvero quella adibita al recupero energetico per mezzo di ricircolo di aria interna. Anche questa abbraccia mandata e ritorno ed è rappresentata in altezza pari alla macchina intera. Le serrande vengono indicate tramite i loro nomi ($S_e$ per quella di mandata aria esterna, $S_u$ per la serranda di uscita aria all'esterno e $S_r$ per il ricircolo). Questi tre elementi sono collegati tra di loro di modo tale da garantire sempre l'apporto di aria trattata necessaria all'ambiente. Nello specifico $S_e$ ed $S_u$ si aprono e chiudono in maniera congiunta ed opposta ad $S_r$. Questo garantisce molte configurazioni dove agli estremi si ha il funzionamento in sola aria esterna (le prime due aperte al massimo e il ricircolo escluso), oppure il funzionamento a tutto ricircolo (è necessario garantire sempre un apporto di aria esterna per cui $S_e$ ed $S_u$ non verranno mai chiuse completamente, ma possono essere ruotate per lasciare trafilare meno portata). In figura 3.3 si può vedere la parte bassa della ruota entalpica (quindi la parte attraversata dalla portata in arrivo dall'ambiente) e la serranda di ricircolo in chiusura. La quota parte di aria che viene riportata in mandata non attraversa lo scambiatore

- Procedendo lungo la parte alta segue la sezione di filtraggio vera e propria. I filtri sono di tipologia "a tasche" dove la sezione di passaggio dell'aria viene ridotta per aumentare l'effetto filtrante. Questi sistemi non sono in grado di rimuovere efficacemente la concentrazione di virus nel flusso d'aria e dunque non può essere fatto affidamento solo a questi per la limitazione del contagio. Come già indicato, non sono filtri assoluti (HEPA) e dunque, contribuiscono

solo in maniera limitata alla riduzione del rischio. Il loro effetto potrà essere preso in considerazione secondo l'utilizzo del parametro di ricambi d'aria esterna equivalente al prossimo capitolo. I fenomeni che descrivono il processo di filtrazione sono spiegati in 2.4.4.

- Le successive due zone attraversate dal flusso sono le batterie termiche che operano attivamente il trattamento di riscaldamento o raffrescamento. Sono collegate all'impianto ad acqua e alla centrale termica che si occupa di portare il fluido alle temperature adatte per il funzionamento corretto della macchina e per l'abbattimento del carico termico in ambiente. Viene inserito anche un termostato antigelo per evitare eventuali inceppi per formazione di ghiaccio. Alla sezione della batteria fredda, seppur non rappresentata in figura, è associata certamente una bacinella di raccolta della condensa: infatti nel processo di condizionamento dell'aria in raffreddamento questa raggiunge l'umidità relativa del 100% ed è inevitabile la formazione di goccioline d'acqua sulle tubature. Queste piovono verso il basso e vengono raccolte ed espulse

- A seguire si trova il separatore di gocce. Sempre per le motivazioni spiegate al punto precedente è inevitabile la formazione di goccioline d'acqua in raffrescamento ed è plausibile che a determinate velocità avvenga il trasporto di parte di queste nel flusso d'aria. Il separatore di gocce evita l'introduzione in ambiente di fastidiose *droplets* che andrebbero a modificare sostanzialmente l'umidità e la temperatura raggiunte con il condizionamento. Il fenomeno della separazione è molto simile a quello dell'impatto spiegato in 2.4.4: l'aria è sottoposta a brusche variazioni di percorso che le goccioline d'acqua in sospensione non possono seguire per via della loro inerzia maggiore. L'efficacia aumenta in funzione della velocità di attraversamento della sezione

- L'aria è dunque accelerata e le perdite di carico della mandata sono vinte da un ventilatore che si preoccupa di spingere in ambiente il flusso. Al motore è collegato un inverter che permette la gestione comoda dei giri al minuto. È controllato tramite sistemi di telecontrollo che verranno discussi in seguito. Sono presenti anche due sonde: un controllo di temperatura e pressione ($T_m$ e $P_m$ stanno appunto per temperatura e pressione di mandata). Viene dunque valutata l'efficacia del condizionamento e del ventilatore per scongiurare eventuali malfunzionamenti all'impianto

- Prima di entrare nelle condotte che porteranno l'aria trattata fino in ambiente è posizionato un silenziatore a setti. Questi sono pannelli di materiale fonoassorbente in grado di ridurre il rumore generato dall'impianto di climatizzazione che può essere canalizzato e trasmesso fino alla stanza. La principale fonte di rumore è sicuramente il ventilatore, ma anche il recuperatore entalpico ed eventuali infiltrazioni, nonché il passaggio dell'acqua e dell'aria possono contribuire ad un livello di decibel troppo elevato

- Dopo essere entrato in ambiente, il flusso è ripreso e riportato nell'UTA. Vengono indicate portate di mandata e ripresa in metri cubi orari e la prima sezione che viene attraversata è nuovamente il silenziatore a setti. Nella stessa camera sono presenti alcuni sensori: le sonde di pressione ($P_r$ sta per pressione di ripresa), di $CO_2$, di temperatura e di umidità ($TH$). La prima valuta le perdite di carico in ambiente ed è un'informazione utile per l'impostazione dei ventilatori. La seconda concerne invece la qualità dell'aria nella stanza come conseguenza dell'occupazione (e dunque della quantità di anidride carbonica emessa dalle persone) e dell'entità della portata di aria esterna (pulita) immessa in ambiente. Viene regolata sulle parti per milione ed è stata inserita nell'ambito dell'emergenza della pandemia negli ultimi documenti trattati in 2.5.1 e 2.5.2. Infine l'ultima valuta le condizioni climatiche nell'ambiente e modifica coerentemente l'apporto di potenza termica e recupero entalpico. Un filtro piano evita l'introduzione nello scambiatore di oggetti e particolati estranei allo stesso modo che in precedenza
- Dopo aver attraversato ricircolo e recupero energetico l'aria è espulsa per messo di una griglia grazie all'operato di un secondo ventilatore. La presenza di due apparecchi è vista necessaria in seguito alle perdite di carico lungo il percorso nonché alla necessità del controllo stretto delle pressioni attraverso il macchinario (infiltrazioni)

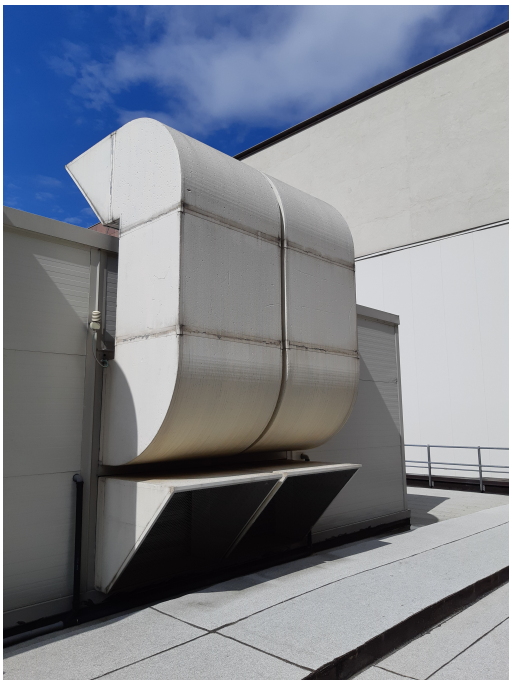


Figura 3.2: Posizione e tipologia della griglie di presa ed espulsione esterne

Figura 3.3: Parte bassa della ruota entalpica e serranda di ricircolo in chiusura

Si riporta ora anche un secondo esempio in figura 3.4 con qualche piccola differenza che può aiutare a capire la diversità e l'eterogeneità delle macchine presenti in un contesto così ampio e complesso come quello di uno dei più grandi atenei italiani. Si evidenziano dunque le seguenti differenze con la precedente:

- Il flusso è incrociato: è dunque un po' più complesso seguire il moto dell'aria che entra dalla presa di aria esterna posta in alto a sinistra e viene mandata in ambiente all'estrema destra. Conseguentemente la ripresa dall'ambiente è posta a sinistra e l'espulsione è rappresentata in alto a destra

- La complessità di questo secondo modo di disegnare lo schema funzionale è a seguito della presenza di un recuperatore di calore statico, disegnato come un rombo al centro della macchina dove i due flussi (mandata e ritorno) si intersecano. Questa tipologia di scambiatore è più efficiente dal punto di vista della pandemia in quanto le due portate sono rigorosamente indipendenti e non vi sono rischi di contaminazione (a meno di evidenti danni strutturali). Il flusso termico nasce dunque per contatto (convezione forzata per mezzo di lamine di metallo). In ogni caso molte macchine sono dotate di apposita serranda di bypass. Questa, seppur non rappresentata in figura, prevede che il recuperatore possa essere escluso e il condizionamento avvenga solamente nelle batterie termiche.

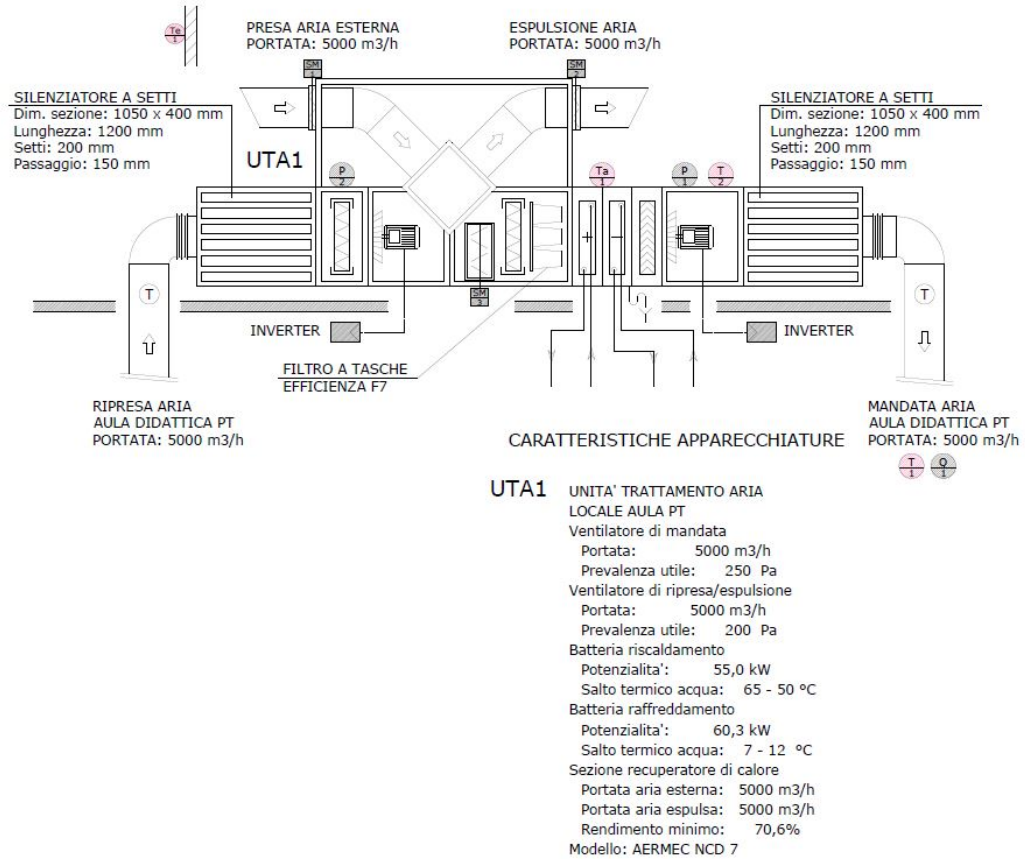



Figura 3.4: Schema funzionale di una UTA del Politecnico

- È inoltre presente la serranda di ricircolo, rappresentata immediatamente sotto il recuperatore. Questa evita che la parte di aria "ricircolata" attraversi il recuperatore e venga espulsa, ma invece fa sì che "continui" il percorso diritto nella macchina e riprenda la strada del condizionamento verso le batterie calda e fredda e la sezione di filtraggio

- Si può notare infine nella parte bassa della batteria fredda il classico simbolo del raccoglitore di condensa che mancava nell'altra rappresentazione (era però sempre presente fisicamente)

- Sono presenti anche tutte le altre sezioni già descritte (silenziatori a setti, separatore di gocce, filtro a tasche, ecc. . . )

Figura 3.5: Recuperatore di calore a flusso incrociato

### 3.1.2 Ispezione delle UTA

Grazie alle rappresentazioni grafiche della tipologia riportata alla sezione precedente, si è potuto ripercorrere il moto dell'aria all'interno di ogni UTA dell'ateneo. Non ci si illuda che questa procedura sia semplice in quanto i disegni sono unicamente rappresentazioni visive e non riportano la composizione della macchina come invece questa si presenta nella realtà. Non è dunque scontato comprendere bene appieno la direzione del flusso dell'aria a una prima occhiata, ma è di fondamentale importanza per associare correttamente le serrande e le sezioni attraversate ed è dunque imperativo perderci del tempo prima di ogni altra cosa. In seguito si provvede a ispezionare visivamente lo stato della UTA e delle sue numerose componenti e parti. Nello specifico, all'atto pratico, i controlli che si sono effettuati riguardano:

1. **Valutazione generale sull'impianto**
   Questo comprende l'analisi degli ambienti asserviti dalla stessa macchina (sistema *monozona* o *multizona*) con i relativi occupanti massimi (posti alunni),

lettura portata nominale e altri dati di targa, evidenti danni strutturali o infiltrazioni di pioggia, stato delle condotte visibili, posizionamento nel locale tecnico, eccetera...

2. **Stato della griglia della presa dell'aria**
   Ciò unicamente laddove questa fosse facilmente ispezionabile in quanto (come è anche possibile notare dalla figura 3.2) è plausibile che alcune di queste siano in posizioni scomode o difficilmente raggiungibili. Questo primo punto è importante per valutare la capacità dell'unità di immettere in ambiente una portata corretta di aria esterna senza risultare in intoppi dovuti a ostacoli grossolani sulla ripresa per via della sporcizia (ad esempio fronde o polvere)

3. **Valutazione ricircolo e stato serrande di ricircolo**
   Tra i punti più importanti per ogni prontuario che voglia additare il problema del contagio c'è il ricircolo. È stato dunque speso tempo ad aprire ogni sezione e valutare lo stato della serranda (in apertura e chiusura) nonché le guarnizioni che evitano le infiltrazioni di altra natura. In questa prima fase è stata valutata in maniera piuttosto superficiale l'entità di queste ultime e la necessità impellente di interventi sostanziali in alcune delle UTA. Viene inoltre azionato il sistema di controllo per la chiusura delle serrande e presa in considerazione la reattività di riposta. In figura 3.6 è possibile vedere come questa prima ispezione visiva possa già evidenziare problemi sostanziali in alcune delle macchine più vecchie. Infatti, per motivi energetici, prima della pandemia è plausibile che molti impianti lavorassero con una buona quota di ricircolo e che queste serrande non venissero chiuse da tempo. Un malfunzionamento come quello riportato nell'immagine è dunque difficile da identificare in condizioni normali e va rigorosamente sistemato. Per capire appieno quando l'entità del danno sia sostanziale è anche valutata semplicemente tramite sensazione di velocità dell'aria su una mano quanta portata trafila in condizioni di totale chiusura

4. **Stato del recuperatore di calore**
   Questa procedura è stata ritenuta necessaria solo laddove il sistema di recupero energetico fosse di tipo rotativo. È già stato descritto, infatti, il funzionamento di un recuperatore statico a flusso incrociato che separa sempre perfettamente le portate non presentando praticamente alcun problema in condizioni di pandemia (e può comunque essere sempre in ogni caso bypassato se ve ne fosse necessità). Si è quindi messa in funzione la UTA a recuperatore entalpico in rotazione e fermo. Se ne è valutato il rumore (un indice di per sè già molto esplicativo), la nascita di vibrazioni, eventuali infiltrazioni evidenti e danni strutturali. Ci si è dunque infine appuntato la tipologia di *arrangement* impiegata in ogni macchina (che in prima approssimazione è già indicativa dell'andamento delle pressioni e delle possibili infiltrazioni)

5. **Valutazione della sezione di filtraggio**
   I filtri associati a macchine come quelle del Politecnico sono in grado solo in parte di trattenere particelle dalle dimensioni delle *droplets* leggere che promuovono la trasmissione airborne. Nonostante ciò alcuni protocolli ne suggeriscono la sostituzione con più efficienti (ovviamente a valle dell'analisi della fattibilità secondo tutte le problematiche già descritte) qualora questi fossero prossimi alla fine della loro vita utile. A tale scopo si è dunque voluto controllare lo stato delle sezioni filtranti

Figura 3.6: Una serranda di ricircolo malfunzionante

Questa prima ispezione è servita per valutare in maniera generale lo stato delle UTA che asservono i vari ambienti per prendere in considerazione quelle più gravemente danneggiate. Queste possono essere sottoposte a interventi per migliorarne la sicurezza in stato di pandemia, oppure, nelle situazioni più gravi, gli ambienti ad esse collegate possono dover essere interdetti.

### 3.1.3 Misura della portata: introduzione

Uno dei parametri di interesse più grande nello studio del funzionamento corretto di queste macchine è, come già ripetuto più volte, la portata di aria esterna. Poiché l'immissione di una gran quantità di aria priva di carica virale ha l'effetto diretto di diluire quelle invece già presenti in ambiente, è chiaro come tanto maggiore questa sia, tanto più sicuro sarà il sistema di ventilazione. Al contempo crescono anche i costi in termini energetici; nel caso del Politecnico ogni UTA è stata inizialmente progettata per poter sostenere anche la modalità in tutta aria esterna ed è dunque dimensionata correttamente anche per funzionare a ricircolo chiuso.
Alla prima ispezione è quindi seguita la misurazione ed il calcolo della portata di aria esterna. Questa può essere ottenuta in due diverse maniere:

- Misura indiretta per mezzo della velocità: si ricorda come $Q = A \cdot v$ e dalla conoscenza della sezione e di un numero sufficiente di velocità si deduce una portata media
- Misura diretta: alcuni strumenti permettono di calcolare direttamente la portata. In realtà anche questi effettuano la stessa operazione già spiegata con la velocità, ma in maniera molto più rigorosa e controllata

Il primo metodo prevede dunque l'utilizzo di un strumento di misura della velocità dell'aria e l'acquisizione di più valori. Questo è denominato anemometro e ne esistono di molteplici tipologie:

- Anemometro a coppette: il più conosciuto. Misura la velocità del vento nelle stazioni meteorologiche. L'utilizzo è indicato per l'esterno e risulta estremamente scomodo nel caso in questione
- Anemometro a ventola: nelle sue versioni digitali palmari più recenti, questo strumento può essere efficacemente utilizzato anche per raggiungere i punti più lontani e scomodi grazie all'introduzione di un supporto rigido modulabile. Il principio segue molto quello dell'anemometro a coppette, nel senso in cui una ventola è lasciata libera di ruotare sotto l'effetto del moto dell'aria e la velocità angolare è conseguentemente convertita. Data la sua compattezza e flessibilità per buona parte dei casi questo è stato adoperato nelle misure di velocità delle UTA
- Anemometro a filo caldo: estremamente più fragile e compatta è questa ulteriore tipologia di strumento. Grazie alle sue dimensioni molto ridotte è stato impiegato, seppur con difficoltà, nelle situazioni che lo ritenessero necessario. Il principio di funzionamento si basa sul fenomeno della convezione forzata: la velocità dell'aria è infatti uno dei parametri fondamentali che può essere ricavato dal calcolo della potenza termica sottratta ad un filo metallico riscaldato elettricamente. Questo deve essere molto sottile ed è importante che sia tenuto con cura

- Altre tipologie: nuove tecnologie hanno dato luce ad altre soluzioni per la misura della velocità dell'aria che si basano su principi di ottica laser, degli ultrasuoni e della risonanza acustica

(a) Anemometro a coppette (b) Anemometro a ventolina (c) Anemometro a filo caldo

Figura 3.7: Tipologie di anemometri più comuni

Lo strumento invece che garantisce una misura più diretta dalla portata viene chiamato *balometro*. Questo è espressamente indicato per la misura della velocità dell'aria negli ambienti interni, dai diffusori presenti nella stanza. È costituito da un convogliatore a forma conica di dimensioni variabili che ridirige il flusso dell'aria verso una sezione di misura opportunamente fornita di fili caldi o ventoline. Poiché questi sono distribuiti coscientemente, la sezione è nota e il flusso è indirizzato per essere il più laminare possibile la misura della portata risulta più efficace e precisa. La conformazione di questo strumento lo rende adatto al collaudo dei diffusori, ma non può essere utilizzato per misure lungo le condotte. È possibile procedere con entrambi gli strumenti, accettando i pro e i contro che ognuno di essi comporta nel valore effettivo finale.

### 3.1.4 Misura della portata: procedura pratica

All'atto pratico è possibile utilizzare entrambi gli strumenti presentati. Per la loro natura è chiaro come l'anemometro venga impiegato direttamente sulla UTA, mentre per il balometro deve essere necessario entrare nell'aula. Segue una descrizione delle criticità delle due scelte:

1. Impiegare un anemometro introduce un grado di incertezza per via dei moti turbolenti che si possono instaurare prima del punto di misura. Infatti per conoscere la portata sono necessarie più misurazioni di modo tale da estrapolare

Figura 3.8: Balometro. Immagine da [68]

una media che poi può essere moltiplicata per la sezione; qualora il punto in cui venisse effettuata tale procedura sia subito dopo una curva è plausibile che i valori ottenuti siano molto disparati e che la deviazione standard sia eccessivamente alta per poter trarre delle conclusioni precise ed accurate. Inoltre è possibile che venga compromessa l'omogeneità della scelta dei vari nodi sulla superficie in analisi. Se si opta erroneamente per punti non equidistanti tra loro, ma più vicini a una parete della condotta, piuttosto che centrali, i valori ottenuti possono essere compromessi da fenomeni locali e il valore finale invalidato. Per una buona misurazione si prevedono necessari prima del punto di misura circa dieci diametri (o diametri equivalenti in caso di sezioni rettangolari) di lunghezza di condotta lineare. Tale accorgimento garantirebbe la linearità del moto, ma è anche molto spesso impraticabile

2. L'utilizzo di un balometro ovvia a tutti i contro indicati al punto precedente in quanto il flusso d'aria è misurato da un diffusore, che tendenzialmente è

progettato per evitare i moti turbolenti, e se ciò non fosse abbastanza questo è convogliato tramite la parte conica. Il lato negativo dell'impiego di questo secondo strumento è il fatto che la misura è effettuata in ambiente e dunque lontano dalla UTA. Ciò implica che se vi fossero infiltrazioni o altri piccoli danni il valore ottenuto potrebbe essere alterato. Il caso peggiore è quello della presenza ricircolo non intenzionale che potrebbe aumentare la portata d'aria in ambiente, ma lasciando credere di essere di origine esterna

3. È chiaro come i due metodi siano diametralmente opposti e si vuole indicare come migliore possibile la procedura che li utilizza entrambi. Si valuta dunque la portata d'aria esterna, in maniera leggermente approssimata, ma in una posizione molto vicina alla griglia di ripresa tramite l'impiego di un anemometro di modo tale da ottenere un valore privo di rumore dovuto alle infiltrazioni. Questo può venire in seguito comparato con il valore ottenuto da una misura in ambiente: se i due risultano in prima battuta simili, si può prendere per buono quello indicato dal balometro (più preciso). Se i due sono invece sostanzialmente diversi si ha qualche problema dovuto alle infiltrazioni o a una condotta in uno stato non buono, oppure sono state effettuate male le misurazioni con l'anemometro. Resta comunque vero il fatto che è inverosimile che si proceda con la misura di portata complessiva (che attraversa l'UTA ed è dunque misurata con il primo metodo) per tutti i diffusori in ogni ambiente e dunque un'altra incertezza è introdotta dal fatto che il secondo risultato è sicuramente ottenuto per mezzo di una moltiplicazione tra la quantità misurata, o una media di queste, da uno o più anemostati, e il loro numero nella stanza.

Per quanto riguarda il mio ateneo si è optato per una procedura del tipo descritto al punto 1 dell'elenco precedente e dunque questa verrà descritta più in dettaglio. In figura 3.9 è possibile vedere cosa è stato effettuato all'atto pratico. I punti sono stati scelti *ad hoc* limitatamente alla possibilità di raggiungere le varie griglie. Lo schema prodotto a seguito di ogni processo di misura era simile a quanto riportato in figura 3.10. Vengono indicati in maniera qualitativa i punti di misura sulla superficie e la velocità dell'aria ivi misurata. Si indicano le dimensioni e forma della griglia e si estrapola la velocità media e la portata. Nel caso in questione:

$$v_m = 3.17\ m/s$$
$$A = 8.7 \times 10^{-1}\ m^2$$
$$Q = A \cdot v_m = 2.76\ m^3/s = 9930\ m^3/h$$

Tale procedura è stata effettuata per molte delle UTA in tutta la sede centrale. Alcune sono state saltate in quanto molto simili, se non perfettamente identiche ad altre già analizzate. I risultati sono stati salvati in un apposito foglio elettronico di calcolo (figura 3.11). In tabella:

(a) Misura su griglia esterna rettangolare con anemometro a ventolina

(b) Misura su griglia esterna circolare con anemometro a ventolina

(c) Misura su condotta interna con anemometro a filo caldo

(d) Misura su griglia di ripresa in aula con anemometro a ventolina

Figura 3.9: Alcuni punti e strumenti di misura

- Viene riportato l'ID della UTA e la sede del Politecnico di riferimento, nonché l'aula che asserve e i posti massimi ad essa associati. I colori sono stati utilizzati

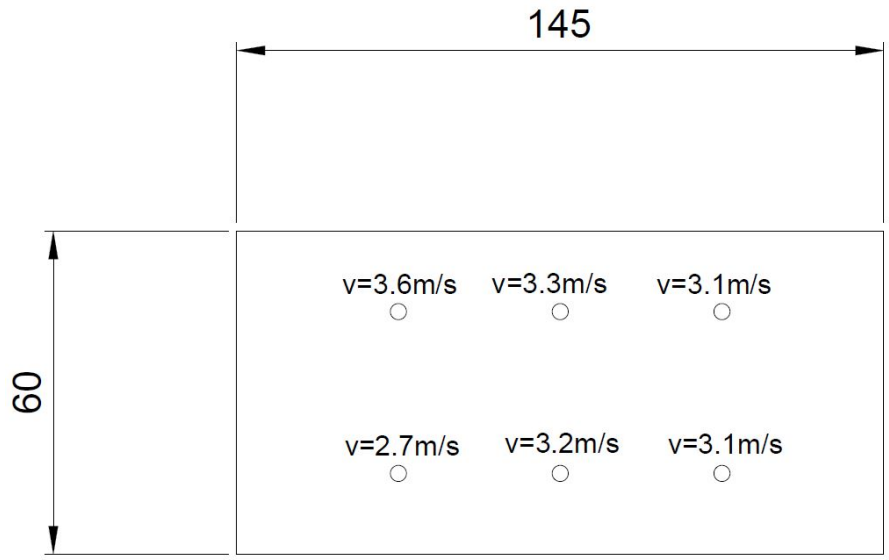



Figura 3.10: Rappresentazione schemi griglie

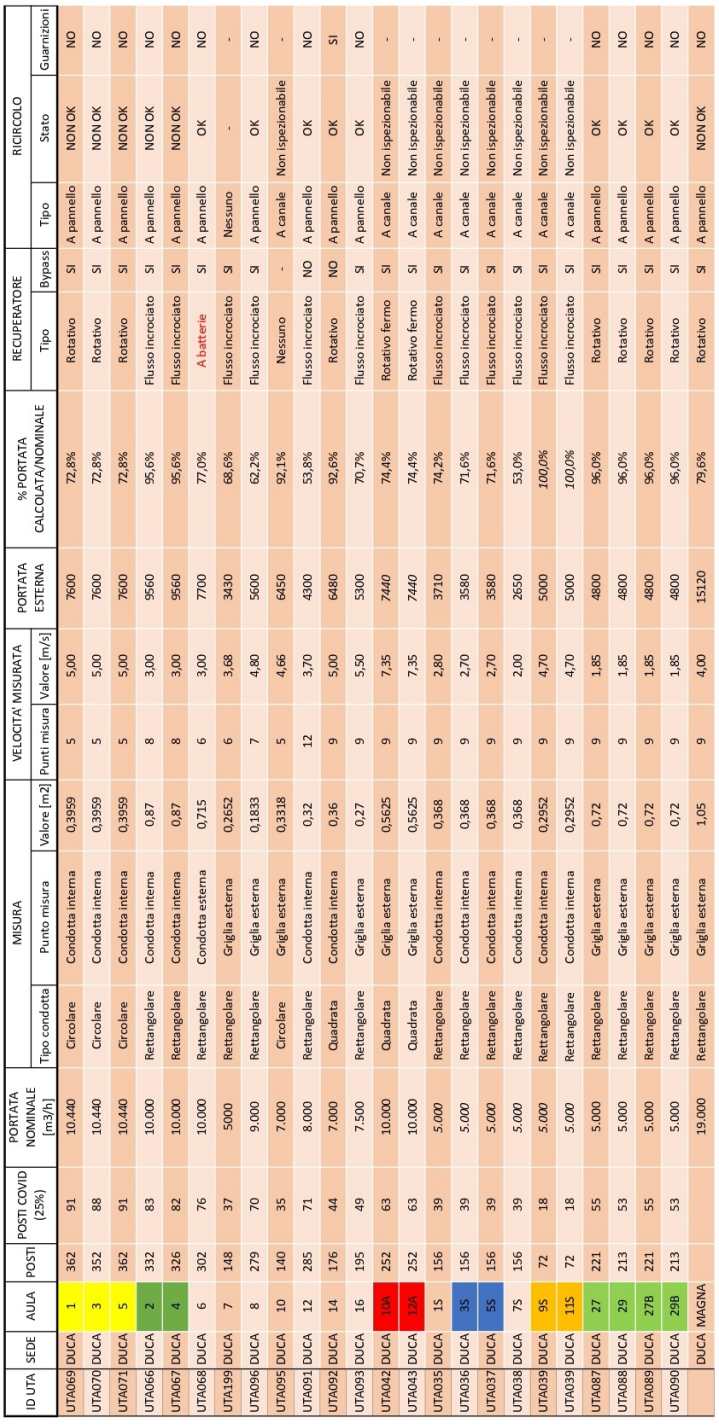
per indicare quelle macchine per cui si è presa valida la misurazione della prima in quanto identiche

- I `POSTI COVID (25%)` sono uno degli interventi che verranno analizzati nella prossima sezione

- La portata nominale è quella di targa indicata dal costruttore. Questa risente molto del montaggio e installazione della macchina e del suo utilizzo continuativo corretto; infatti aggiungere strozzature, ostacoli, nuove sezioni o filtri inefficienti, o imporre in qualsivoglia altra maniera delle perdite di carico, allo stesso modo che aumentare la prevalenza dei ventilatore rende questo numero virtualmente privo di significato. Nonostante ciò può essere utilizzato come banco di prova del corretto funzionamento della macchina e così è fatto nella colonna: `% PORTATA CALCOLATA/NOMINALE`

- Nella colonna del recuperatore è indicata la tipologia e la presenza di un bypass. Come si può notare la maggior parte dei casi prevede un bypass anche nei rotativi che possono dunque essere non solo fermati, ma anche esclusi dal percorso dell'aria

- Il ricircolo può essere a pannello o a canale. Nel primo caso l'ispezione è semplice in quanto basta aprire la sezione corrispondente nell'UTA e la serranda è immediatamente presente. Nel caso in cui il ricircolo sia invece installato direttamente sulle condotte (e non nella macchina) questo risulta più difficile



| ID UTA | SEDE | AULA | POSTI | POSTI COVID (25%) | PORTATA NOMINALE [m3/h] | MISURA | | | VELOCITA' MISURATA | | PORTATA ESTERNA | % PORTATA CALCOLATA/NOMINALE | RECUPERATORE | | RICIRCOLO | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Tipo condotta | Punto misura | Valore [m2] | Punti misura | Valore [m/s] | | | Tipo | Bypass | Tipo | Stato | Guarnizioni |
| UTA069 | DUCA | 1 | 362 | 91 | 10.440 | Circolare | Condotta interna | 0,3959 | 5 | 5,00 | 7600 | 72,8% | Rotativo | SI | A pannello | NON OK | NO |
| UTA070 | DUCA | 3 | 352 | 88 | 10.440 | Circolare | Condotta interna | 0,3959 | 5 | 5,00 | 7600 | 72,8% | Rotativo | SI | A pannello | NON OK | NO |
| UTA071 | DUCA | 5 | 362 | 91 | 10.440 | Circolare | Condotta interna | 0,3959 | 5 | 5,00 | 7600 | 72,8% | Rotativo | SI | A pannello | NON OK | NO |
| UTA066 | DUCA | 2 | 332 | 83 | 10.000 | Rettangolare | Condotta interna | 0,87 | 8 | 3,00 | 9560 | 95,6% | Flusso incrociato | SI | A pannello | NON OK | NO |
| UTA067 | DUCA | 4 | 326 | 82 | 10.000 | Rettangolare | Condotta interna | 0,87 | 8 | 3,00 | 9560 | 95,6% | Flusso incrociato | SI | A pannello | NON OK | NO |
| UTA068 | DUCA | 6 | 302 | 76 | 10.000 | Rettangolare | Condotta esterna | 0,715 | 6 | 3,00 | 7700 | 77,0% | A batterie | SI | A pannello | OK | NO |
| UTA199 | DUCA | 7 | 148 | 37 | 5000 | Rettangolare | Griglia esterna | 0,2652 | 6 | 3,68 | 3430 | 68,6% | Flusso incrociato | SI | Nessuno | - | - |
| UTA096 | DUCA | 8 | 279 | 70 | 9.000 | Rettangolare | Griglia esterna | 0,1833 | 7 | 4,80 | 5600 | 62,2% | Flusso incrociato | SI | A pannello | OK | NO |
| UTA095 | DUCA | 10 | 140 | 35 | 7.000 | Circolare | Griglia esterna | 0,3318 | 5 | 4,66 | 6450 | 92,1% | Nessuno | - | A canale | Non ispezionabile | - |
| UTA091 | DUCA | 12 | 285 | 71 | 8.000 | Rettangolare | Condotta interna | 0,32 | 12 | 3,70 | 4300 | 53,8% | Flusso incrociato | NO | A pannello | OK | NO |
| UTA092 | DUCA | 14 | 176 | 44 | 7.000 | Quadrata | Condotta interna | 0,36 | 9 | 5,00 | 6480 | 92,6% | Rotativo | NO | A pannello | OK | SI |
| UTA093 | DUCA | 16 | 195 | 49 | 7.500 | Rettangolare | Griglia esterna | 0,27 | 9 | 5,50 | 5300 | 70,7% | Flusso incrociato | SI | A pannello | OK | NO |
| UTA042 | DUCA | 10A | 252 | 63 | 10.000 | Quadrata | Griglia esterna | 0,5625 | 9 | 7,35 | 7440 | 74,4% | Rotativo fermo | SI | A canale | Non ispezionabile | - |
| UTA043 | DUCA | 12A | 252 | 63 | 10.000 | Quadrata | Griglia esterna | 0,5625 | 9 | 7,35 | 7440 | 74,4% | Rotativo fermo | SI | A canale | Non ispezionabile | - |
| UTA035 | DUCA | 1S | 156 | 39 | 5.000 | Rettangolare | Condotta interna | 0,368 | 9 | 2,80 | 3710 | 74,2% | Flusso incrociato | SI | A canale | Non ispezionabile | - |
| UTA036 | DUCA | 3S | 156 | 39 | 5.000 | Rettangolare | Condotta interna | 0,368 | 9 | 2,70 | 3580 | 71,6% | Flusso incrociato | SI | A canale | Non ispezionabile | - |
| UTA037 | DUCA | 5S | 156 | 39 | 5.000 | Rettangolare | Condotta interna | 0,368 | 9 | 2,70 | 3580 | 71,6% | Flusso incrociato | SI | A canale | Non ispezionabile | - |
| UTA038 | DUCA | 7S | 156 | 39 | 5.000 | Rettangolare | Condotta interna | 0,368 | 9 | 2,00 | 2650 | 53,0% | Flusso incrociato | SI | A canale | Non ispezionabile | - |
| UTA039 | DUCA | 9S | 72 | 18 | 5.000 | Rettangolare | Condotta interna | 0,2952 | 9 | 4,70 | 5000 | 100,0% | Flusso incrociato | SI | A canale | Non ispezionabile | - |
| UTA039 | DUCA | 11S | 72 | 18 | 5.000 | Rettangolare | Condotta interna | 0,2952 | 9 | 4,70 | 5000 | 100,0% | Flusso incrociato | SI | A canale | Non ispezionabile | - |
| UTA087 | DUCA | 27 | 221 | 55 | 5.000 | Rettangolare | Griglia esterna | 0,72 | 9 | 1,85 | 4800 | 96,0% | Rotativo | SI | A pannello | OK | NO |
| UTA088 | DUCA | 29 | 213 | 53 | 5.000 | Rettangolare | Griglia esterna | 0,72 | 9 | 1,85 | 4800 | 96,0% | Rotativo | SI | A pannello | OK | NO |
| UTA089 | DUCA | 27B | 221 | 55 | 5.000 | Rettangolare | Griglia esterna | 0,72 | 9 | 1,85 | 4800 | 96,0% | Rotativo | SI | A pannello | OK | NO |
| UTA090 | DUCA | 29B | 213 | 53 | 5.000 | Rettangolare | Griglia esterna | 0,72 | 9 | 1,85 | 4800 | 96,0% | Rotativo | SI | A pannello | OK | NO |
| | DUCA | MAGNA | | | 19.000 | Rettangolare | Griglia esterna | 1,05 | 9 | 4,00 | 15120 | 79,6% | Rotativo | SI | A pannello | NON OK | NO |

Figura 3.11: Tabella del foglio elettronico per il calcolo del rischio di contagio

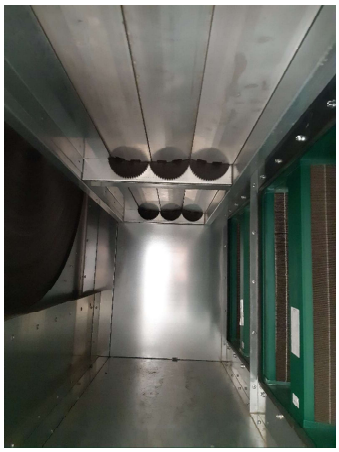
da ispezionare ed è necessario più tempo per smontare la sezione *sfilabile* corrispondente. In questa prima analisi i ricircoli a canale non ispezionabili sono stati assunti funzionanti

- Per una maggiore sicurezza si è controllato anche la presenza e lo stato delle guarnizioni che però risultano assenti in molte delle serrande di ricircolo. Queste sono solamente un'ulteriore misura di prevenzione e non compromettono la validità delle misure se il ricircolo si chiude in maniera buona

### 3.1.5 Ulteriore documentazione prodotta

A supporto della stesura sintetica della tabella di figura 3.11 sono stati prodotti anche altri documenti più precisi chiamati schede UTA. Questi racchiudono in sè non solo le informazioni poi tradotte in forma tabellare sul foglio di calcolo, ma anche delle foto (sempre molto importanti per significare che l'ispezione visiva sia andata a buon fine) e delle note sulle procedure di misurazioni, tra cui gli intoppi incontrati (ad esempio griglie sporche o la possibilità di avere più riprese sparse per l'ateneo), le criticità riscontrate (ad esempio la disuguaglianza forte tra portata calcolata e nominale, o la necessità di prendere le misurazione a valle di una curva e in presenza di turbolenze) e i piccoli disguidi (ad esempio una serranda che non rimane in posizione e per le misurazioni è necessario che un membro del team la tenga chiusa a forza). In figura 3.12 si trova rappresentato uno di questo documenti. Quello che manca ad un *report* di questa tipologia è l'analisi dell'ambiente che queste macchine asservono. Si è sempre infatti fatto riferimento alla UTA per calcolare il rischio di contagio, ma è anche molto importante la distribuzione dell'aria in ambiente. Se l'informazione riguardante il numero di posti massimi presenti in aula è sicuramente fondamentale manca una rappresentazione grafica di mandate e riprese e le misurazioni *in loco* secondo la procedura indicata all'ultimo punto dell'elenco di 3.1.4 (come si è fatto per alcuni ambienti specifici in figura 3.9d). Si può dunque stilare della documentazione aggiuntiva secondo le modalità rappresentate in figura 3.13. Ciò andrebbe a integrare quanto riportato nel foglio di calcolo con l'effettiva portata d'aria esterna immessa in ambiente (sempre premettendo che tutte le misurazioni siano state fatte a **ricircolo chiuso**). Si vuole far notare che, se la scheda UTA è rappresentativa di un caso reale ed è una pagina di un *report* effettivamente stilato, la scheda dell'aula è invece *solamente a titolo di esempio* di come si sarebbe potuto procedere. Non sono stati infatti prodotti documenti del genere per il Politecnico e i valori numerici non sono stati misurati sul campo.
È inoltre possibile leggere nelle sezioni di questa tesi 2.5.3 e 2.6 che alcuni prontuari prevedono una velocità dell'aria massima in ambiente che non dev'essere trascurata laddove la presenza di un occupante infetto ha un'alta probabilità (come nel caso di lezioni molto frequentate degli studenti dei primi anni). Le informazioni contenute in tale *report* possono dunque aiutare, anche per mezzo del reperimento delle

## UTA Aula 14



DATI DI TARGA:

- Posti asserviti: 176
- Portata nominale: 7.000 m3/h

PUNTO MISURA:

- Condotta interna
- Condotta quadrata

RISULTATI:

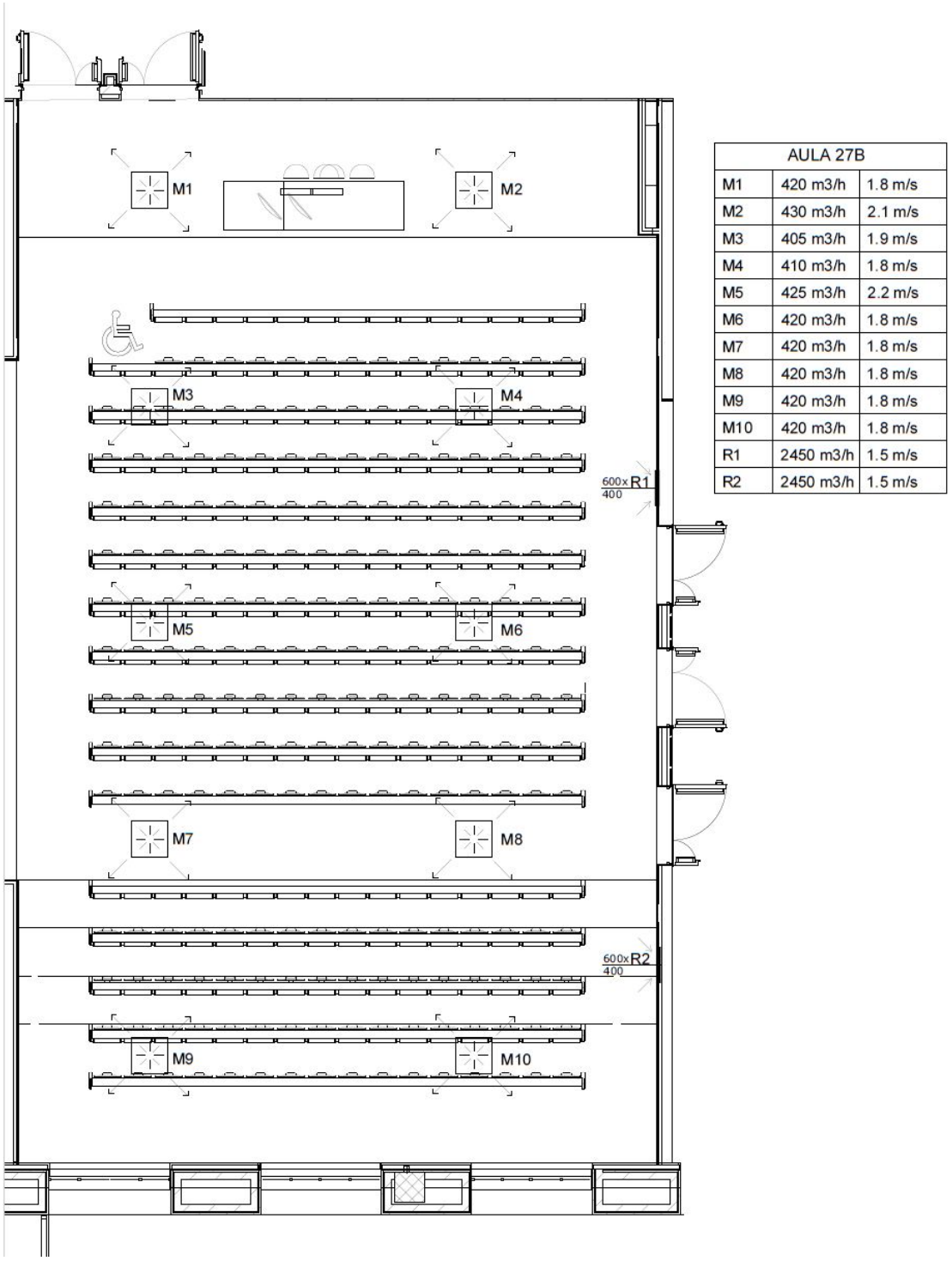
- Portata esterna: 6480 m3/h
- Portata misurata/nominale: 92.6%

STATO ACCESSORI:

- Recuperatore Rotativo senza Bypass
- Ricircolo a pannello: OK

L'impianto di questa aula è molto nuovo. Abbiamo riscontrato numerosi problemi di incongruenza con le portate. Infatti, prendendo la misura su una griglie esterna, sebbene sia stata accuratamente ripulita, i numeri erano troppo bassi. Infine, si è optato per prendere la misura in condizioni non ottimali su una condotta interna soggetta a forte turbolenza (nei pressi vicini di una curva). Si suppone che ci siano più griglie di ripresa aria esterna. L'inverter è stato messo al 75%. Una piccola nota sulla serranda di mandata aria esterna (in foto sotto): non resta aperta ma va tenuta manualmente. Ciò ha complicato ancora più le misurazioni.

Figura 3.12: Esempio scheda di una UTA del Politecnico




| AULA 27B | | |
|---|---|---|
| M1 | 420 m3/h | 1.8 m/s |
| M2 | 430 m3/h | 2.1 m/s |
| M3 | 405 m3/h | 1.9 m/s |
| M4 | 410 m3/h | 1.8 m/s |
| M5 | 425 m3/h | 2.2 m/s |
| M6 | 420 m3/h | 1.8 m/s |
| M7 | 420 m3/h | 1.8 m/s |
| M8 | 420 m3/h | 1.8 m/s |
| M9 | 420 m3/h | 1.8 m/s |
| M10 | 420 m3/h | 1.8 m/s |
| R1 | 2450 m3/h | 1.5 m/s |
| R2 | 2450 m3/h | 1.5 m/s |

Figura 3.13: Esempio scheda di un'aula del Politecnico

schede tecniche dei diffusori utilizzati (da internet o dagli archivi degli uffici di competenza), a dare una stima di questa, che può anche essere misurata in ambiente sempre per mezzo di anemometri (in maniera molto sperimentale). La figura 3.14

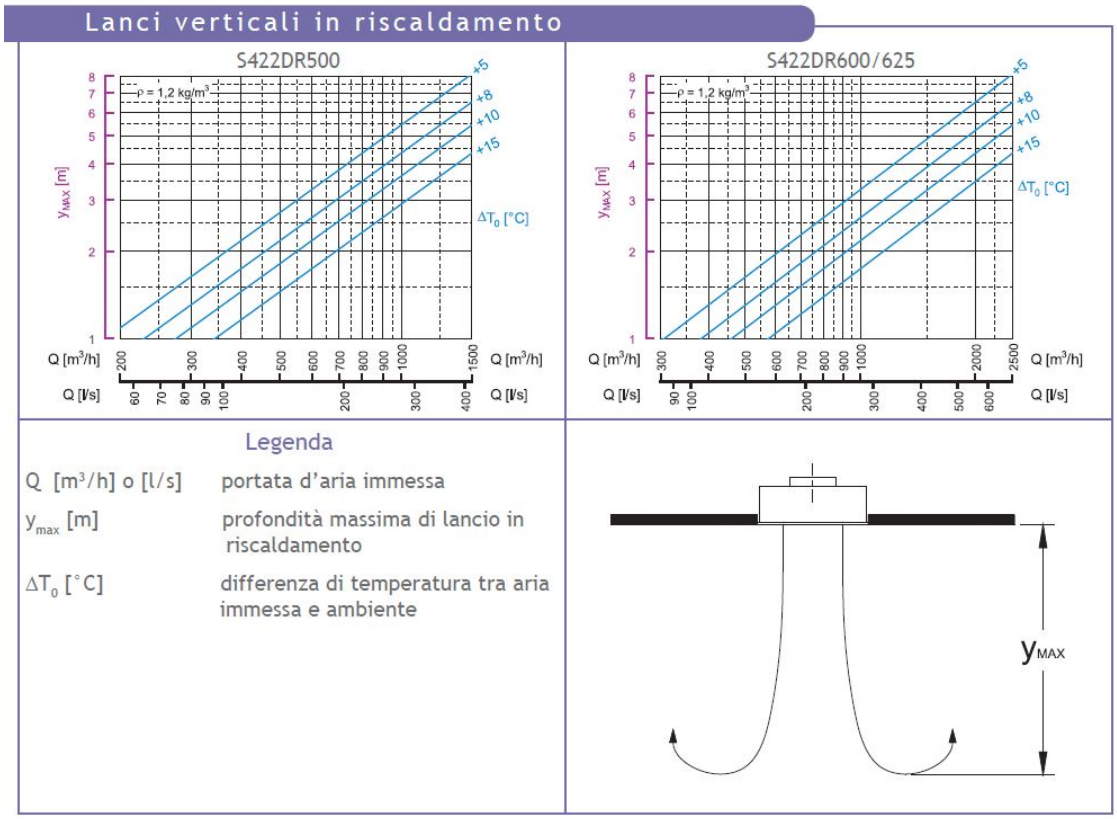



Figura 3.14: Diagrammi lancio verticale da scheda tecnica [49]

rappresenta uno dei numerosissimi grafici inclusi nelle schede tecniche dei diffusori. Questi possono aiutare a comprendere meglio la diffusione dell'aria in ambiente e facilitare il calcolo delle velocità in modo da garantire il rispetto delle condizioni imposte dagli enti regolanti.

## 3.2 Gli interventi applicativi

Dopo aver ispezionato visivamente le macchine e aver calcolato in prima battuta la portata d'aria esterna si è pensato agli interventi da applicare per ridurre il rischio di contagio negli ambienti effettivamente asserviti dalle UTA. Questi possono essere riassunti nel seguente punto elenco:

1. **Funzionamento in tutta aria esterna**
   Il primo intervento riguarda il ricircolo. Si è scelto di operare in tutta aria

esterna per massimizzare la diluizione di eventuali cariche virali presenti in ambiente. Questo è operato tramite il sistema di telecontrollo centralizzato del Politecnico negli uffici tecnici. Le macchine sono tutte collegate ad un server attraverso il quale se ne può operare la modifica dei parametri di funzionamento, tra cui la percentuale di ricircolo. Questi server sono collegati a dei terminali che riportano anche tutti i risultati della sensoristica installata. Le serrande vengono dunque *in primis* chiuse elettronicamente, ma per quegli impianti dove queste erano poco funzionanti, oppure per tutti i sistemi *multizona*, è stato previsto una chiusura di tipo ermetica meccanica per mezzo dell'installazione di un pannello rigido. Tale accorgimento garantisce una tenuta molto migliore delle infiltrazioni ed è necessaria in tutte quelle situazioni risultate più critiche dopo le prime ispezioni. Come già detto, tutte le UTA della sede centrale sono state progettate e dimensionate per poter lavorare in tutta aria esterna e non sono state necessarie altre sostituzioni

2. **Riduzione occupanti delle aule**
   Per evitare il contagio è necessario rispettare il distanziamento sociale. Questo può essere applicato riducendo in maniera netta il numero massimo di persone ammissibili in determinati ambienti. Tale accorgimento permette di evitare il contagio diretto, ma limita sostanzialmente anche la nascita di *droplets* airborne. È infatti meno probabile la presenza di un occupante infetto laddove vengano interdetti numerosi posti e, qualora questo fosse comunque presente, un buon funzionamento dell'impianto di ventilazione, associato ad un'elevata efficienza di lavaggio (ovvero il fenomeno per cui l'aria tende ad entrare e uscire dalla zona occupata senza sostarvi a lungo) può garantire una maggiore sicurezza anche per le persone vicine. Il numero scelto per tale riduzione è stato il 25%. Questo è suggerito dagli enti regolanti, ma verrà anche sottoposto a controllo nel capitolo successivo e verrà ivi validato. L'applicazione rigorosa del rispetto dei numeri massimi previsti è un problema secondario non da poco e deve essere affrontato come parte integrante della pandemia

3. **Ridurre il valore di $CO_2$ che aziona gli allarmi**
   Come già suggerito in 2.5.1 e 2.5.2 è stato modificato il valore di taratura della sensoristica per l'anidride carbonica in ambiente: questo è abbassato fino a $600ppm$ per prendere immediatamente precauzioni nel caso in cui un impianto di ventilazione venisse meno oppure gli occupanti fossero più del previsto. I segnali vengono inviati ai terminali tramite i server di telecontrollo e possono essere comodamente gestiti dall'ufficio tecnico competente. Laddove questi valori risultassero comunque sempre eccessivi si potrebbe procedere con l'interdizione dell'aula. Questo nuovo valore dovrà essere sicuramente oggetto di modifiche e raffinazioni col passare del tempo e delle stagioni in quanto, se fosse troppo ridotto, potrebbe essere influenzato sostanzialmente dall'inquinamento esterno (che a Torino non è trascurabile)

4. **Apertura finestre**
   I serramenti esterni possono essere utilizzati in maniera sostanziale in tutti quegli ambienti non asserviti da un vero e proprio impianto di ventilazione meccanica. I piani alti della sede centrale sono infatti climatizzati tramite ventilconvettori e impianti a ricircolo locale che sono ancora oggetto di studio e discussione aperta. Qualora invece sia presente ventilazione forzata l'apertura delle finestre segue il buon senso, ma non può sostituire l'effetto dell'immissione di aria pulita esterna. Ciò alla luce del fatto che per tutti quegli ambienti in pressione rispetto all'esterno (come le aule universitarie), l'apertura dei serramenti contribuirebbe ad una fuoriuscita di volume inquinato, ma non necessariamente ad un nuovo apporto di aria fresca. Al contempo i carichi termici verrebbero sostanzialmente aumentati con rischi legati al discomfort non indifferenti.

5. **La questione dei recuperatori rotativi**
   Se i recuperatori statici a piastre non danno alcun problema, si è invece ragionato a lungo riguardo alle ruote entalpiche. Alla luce del buono stato in cui sono state trovate a seguito dell'ispezione delle UTA, si è optato per evitarne lo spegnimento, almeno laddove la situazione non risultasse critica per altre ragioni. I motivi sono sostanzialmente di natura prettamente energetica: questi componenti sono infatti fondamentali in molte delle macchine per garantire l'abbattimento coretto dei carichi termici in ambiente. È infine stata presa in considerazione anche l'idea di aggiungere della sensoristica a valle e monte del recuperatore per un controllo più raffinato delle pressioni, ma in molti dei casi non è risultato necessario per via del buon funzionamento dei motori e dei ventilatori all'interno delle UTA.

6. **Funzionamento continuo a portata nominale**
   Per quanto riguarda il funzionamento in continuo si è optato per la scelta di accendere e spegnere gli impianti prima e dopo l'ingresso degli studenti in aula. Questo, accompagnato da una buona gestione dell'apertura delle finestre, può risultare sufficiente per annullare la carica virale in ambiente, come indicato da molti degli enti regolanti. Sono inoltre stati impostati tutti i ventilatori per funzionare con gli inverter al massimo. Infatti, laddove la chiusura della serranda di ricircolo fosse garantita senza infiltrazioni, questa impostazione garantirebbe il massimo apporto possibile di aria esterna (sempre con l'ipotesi che il dimensionamento delle batterie termiche possa rispettare i vincoli di temperatura per il comfort in ambiente).

# Capitolo 4

# Il modello del rischio di contagio

## 4.1 La teoria di Wells e Riley

"The response induced by infective droplet nuclei is quantal; the probability that an airborne particle, drifting at random indoors, will be breathed before it is vented is governed by chance. The number of occupants who become infected bears a Poisson relation to the number of infective particles which they breathe; 63.2 per cent of the occupants will be infected when, on the average, each occupant breathed 1 infective particle. Hence, by definition, 36.8% of the occupants homogenously exposed to quanta of infection will not respond. Thus, in our experiments with rabbits 1 tubercle of Ravenel strain constitutes a quantum of infection when breathed as a fine droplet nucleus"

---

Wells W. (1955) Airborne Contagion and Air Hygiene, pp 140-141

Nel corso degli anni i modelli per il calcolo del rischio di contagio si sono susseguiti con più o meno successo, ma il primo e il più riconosciuto globalmente rimane quello introdotto inizialmente da William F. Wells che per primo parlò di teoria dei quanti di infezione. Questa sostiene che un contagio può essere modellato tramite diffusione discreta attraverso particelle (o conglomerati di queste) denominate appunto *quanta*. Un *quantum* è definito per ipotesi da una probabilità del 63.2% di infettare un soggetto suscettibile se inalato. Tale valore è ottenuto come il risultato di $1 - 1/e$ come ci spiega nuovamente Wells:
"When on the average one animal breathes one quantum, [...] 36.8% of the animals will survive, since this is the fraction whose negative natural logarithm is 1. Thus 1 quantum of contagium has been breathed per animal when 63.2% of the animals become infected"

---

Wells W. (1955) Airborne Contagion and Air Hygiene, pp 120-121

Nel 1978 G. Murphy e i fratelli Riley (medico e ingegnere) integrano quanto proposto poco più di vent'anni prima per includere meglio gli effetti sull'essere umano. Il risultato è l'ormai noto modello Wells-Riley che andremo ad applicare in alcune delle sue varianti. La definizione di *quantum* è stata criticata da parte della comunità scientifica per il fatto di essere circolare: ovvero la definizione della contagiosità di una malattia per mezzo di una quantità che dipende da e influenza la stessa. Ciò comporta dunque la necessità di conoscere a monte già i mezzi e le modalità di diffusione della malattia nonché la stessa infettività. Nonostante ciò il metodo è ad oggi rivisitato costantemente ed è ritenuto una pietra miliare nell'analisi del rischio di infezione.

### 4.1.1 Il modello WR

La formula di Wells-Riley dice che:

$$P_{infection} = \frac{Cases}{Susceptibles} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right) \tag{4.1}$$

dove:

- $P_{infection}$ è la probabilità percentuale di essere contagiati
- $I$ è il numero di infetti in ambiente
- $q$ è la generazione di *quanta* nell'unità di tempo $[h^{-1}]$
- $p$ è il *pulmonary rate* o tasso di respirazione e indica la quantità di aria emessa dai soggetti in ambiente $[m^3/h]$
- $Q$ è la portata di rinnovo introdotta dal sistema di ventilazione $[m^3/h]$
- $t$ è il tempo di esposizione di infetto e suscettibile $[h]$

Questa formula si basa sulle seguenti ipotesi:

1. I *droplet nucleii* sono uniformemente distribuiti in tutto l'ambiente. Questo rientra nel fenomeno della perfetta miscelazione. È chiaro che un sistema di ventilazione con un'ottima efficienza di lavaggio può già mettere in discussione questa prima ipotesi: infatti le cariche virali non si distribuirebbero uniformemente, ma, seguendo i flussi d'aria in ambiente, andrebbero coerentemente ad essere raccolte dalla ripresa ed espulse all'esterno (se il ricircolo è chiuso). Una conseguenza principale di questa prima ipotesi è il fatto che la probabilità di essere contagiati è dunque costante in tutto lo spazio occupato e le posizioni di suscettibile e infetti in ambiente non sono rappresentate

2. Non si considera il livello microscopico per quanto riguarda la deposizione del virus sulle superfici, l'inattivazione per mezzo di radiazione elettromagnetica, agenti disinfettanti od altro

Tale rappresentazione di contagio è definita stazionaria poiché l'emissione di cariche virali in ambiente è costante nel tempo ($q$ non è funzione di $t$) e in quanto non si è differenziazione tra i periodi di occupazione di infetto e suscettibile.
Già da questa prima formula semplificata è possibile notare quali sono gli interventi che agiscono nell'interesse della riduzione della probabilità di contagio: la diminuzione di $t$ (*exposure time*), ma soprattutto l'aumento di $Q$ portata d'aria esterna. Questo parametro, in quanto unico a denominatore, è quello con il maggior effetto sull'intero termine ad esponente ed è quindi centrale la sua determinazione, nonché il suo controllo. Come infatti già ripetuto più volte, basandosi questo metodo sulla diluizione perfetta di patogeno in ambiente più ricambi orari conseguono in un potenziato effetto di lavaggio della stanza e asportazione di carica virale. Inoltre:

1. Non vengono prese in considerazione le differenze tra suscettibilità dei soggetti nell'ambiente. A seconda, infatti, della corporatura, della salute pregressa e dell'età alcuni occupanti potrebbero contrarre la malattia in maniera sostanzialmente diversa

2. Il tasso di immissione di *quanta* in ambiente da parte delle persone malate è costante nel tempo (ipotesi di stazionarietà). Questo valore verrà discusso più ampiamente nella prossima sottosezione

3. Il periodo di latenza della malattia è molto più lungo del tempo di esposizione. Questo significa che le persone malate o che contraggono il contagio ne manifestano la sintomatologia e le conseguenze più gravi dopo che lo studio è già concluso. Non si prende infatti in alcun modo considerazione che un suscettibile possa diventare, durante il periodo in analisi, esso stesso un infetto laddove questo venga contagiato in ambiente

4. Il numero di persone infette rimane costante durante il periodo in analisi. Sia per quanto riguarda l'ingresso o l'uscita, sia per quello che concerne quanto detto al punto precedente. I modelli successivi riusciranno efficacemente a togliere questa importante ipotesi per mezzo di integrali e discretizzazioni temporali

5. Il tasso di rimozione di *droplet nucleii* per mezzo di rinnovo d'aria fresca o per altri metodi (ad esempio irradiazione elettromagnetica con UVGI) rimane costante nel tempo. Tutte queste ipotesi di costanza temporale continuano a validare l'ipotesi principale di stazionarietà e semplificano sostanzialmente le formulazioni finali, ottenute appunto per risoluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali. Nei prossimi paragrafi si analizzerà infatti anche meglio

quello che riguarda la dimostrazione matematica che ha portato alle equazioni più importanti

6. L'aria immessa in ambiente per diluire è alla stessa temperatura e pressione di quella già presente in ambiente. Questa ipotesi risulterebbe molto limitante nella modellazione degli impianti di climatizzazione se non venisse preceduta da quella di perfetta miscelazione. Infatti è possibile sostenere che anche laddove l'impianto immettesse aria per riscaldare o rinfrescare la stanza, questa assumerebbe immediatamente le condizioni mantenute in ambiente. Tale punto viene comunque inserito tra le ipotesi per cercare di comprendere appieno anche le sostanziali limitazioni di questo metodo, che saranno oggetto di futuri ragionamenti

7. Esiste una proporzionalità diretta tra il numero di persone infette e l'aspirazione di *quanta* da parte dei suscettibili. Questa può essere intesa come una somma di alcune delle ipotesi già sostenute: tanti più infetti ci sono in ambiente tanto più frequente sarà l'incontro tra un sano e un *quantum* di infezione

### 4.1.2 I parametri variabili

Una limitazione di un modello di questa tipologia è che si basa su molti parametri complessi. Nello specifico si fa riferimento alle cariche virali emesse per unità di tempo $q$, ma anche, sebbene in secondo piano, al tasso polmonare $p$. Se si volesse procedere con un'analisi molto dettagliata del rischio di contagio per mezzo di un modello come quello proposto da Wells e Riley si dovrebbero tenere conto non solo della tipologia di occupanti (come già indicato nelle ipotesi precedenti questa è già per trascurabile) ma anche dell'attività effettuata da ognuno nel dettaglio, dell'età, dello stato di salute, del metabolismo, eccetera... Questo contribuirebbe solo in parte alla determinazione dei parametri: infatti il vero scoglio, per quanto concerne il SARS-CoV-2 resta il valore di $q$. Questo è proprio per ogni malattia e dipende dalla tipologia di azioni nocive che il virus causa all'interno del corpo, dall'infettività alla tendenza a permanere nell'apparato respiratorio superiore, dal tempo di inattivazione alla resilienza in ambiente a determinate condizioni di temperatura, umidità, ed altro. La comunità scientifica è ancora molto divisa sul numero da attribuire al COVID-19. In [51] si effettua una regressione lineare con altre malattie già conosciute e si ottengono dei valori tra $q = 14 \div 48\ h^{-1}$, in contrasto con le più recenti analisi che invece suggeriscono un range molto più ampio tra $q = 10 \div 10^3\ h^{-1}$ a seconda dell'attività compiuta. In [52] sono invece considerate i valori studiati numerosi contagi e per le SARS passate di ha un range tra $q = 10 \div 300\ h^{-1}$ di cui si potrebbe conservativamente prendere per buono il valore superiore. In figura 4.1 si può notare come la determinazione di $q$ sia influente sul calcolo della probabilità di infezione. L'indecisione che ancora sorvola questo parametro è eccessiva, ma alcuni studi [8,53] paiono andare più a fondo sulla discussione e riportare un valore

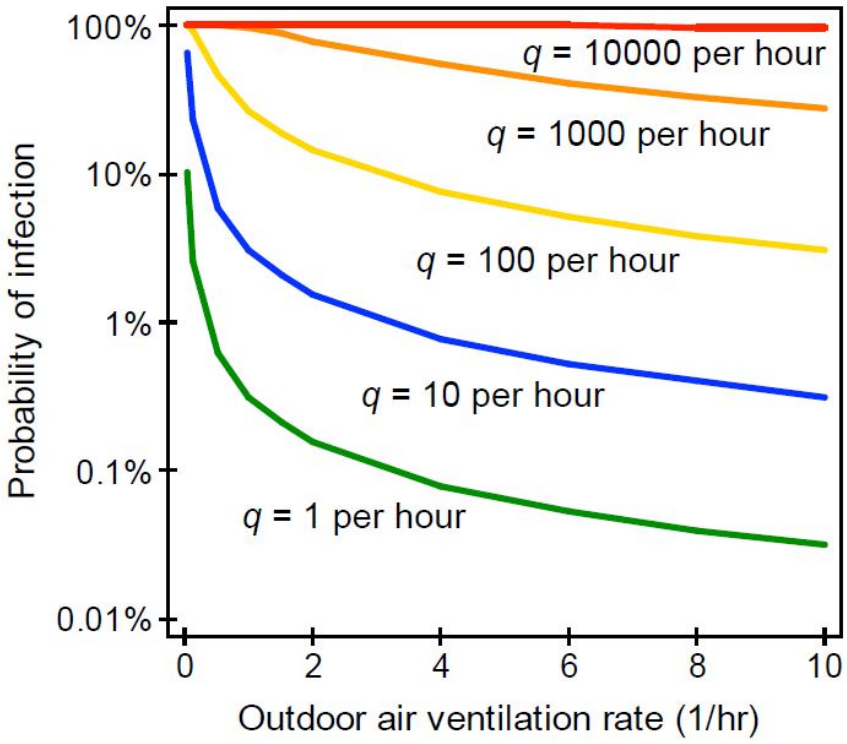



Figura 4.1: Influenza di $q$ sul calcolo di $P_{infection}$

numerico calcolato secondo modalità rigorose. Nello specifico:

$$q = c_v \cdot V_{br} \cdot N_{br} \int_0^{10\mu m} N_d(D) dV_d(D) \tag{4.2}$$

dove:

- $c_v$ è la carica specifica. Questa viene misurata in copie di RNA virale al millilitro di saliva espulsa e rappresenta la reale quantità di patogeno emesso da un soggetto infetto. Questo è ben noto, ma la definizione di $q$ prende in considerazione tanti altri fattori

- $V_{br}$ è il volume d'aria emesso per ogni respiro, anche chiamato in termini specifici *volume corrente*. Questo, in una persona adulta sana si aggira intorno ai $500mL$ per inspirazione o $7mL$ al $kg$ di massa corporea[1]. Tali valori numerici sono calcolati in situazione di normale respirazione, a riposo e senza alcun intenzione

[1]Da Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Tidal_volume

- $N_{br}$ è il tasso di respirazione. È chiaro come il prodotto di tale valore per quello precedente ha come risultato il *pulmonary rate* già definito in precedenza. Questa circolarità di definizione rientra anche nelle critiche di alcuni già indicate
- $N_d(D)$ è la concentrazione di *droplet* in parti al centimetro cubo di aria espirata. Ciò dipende sicuramente dal diametro della gocciolina in analisi
- $V_d(D)$ è il volume di una singola *droplet* in millilitri (è quindi già effettuata una conversione per mezzo della densità) come funzione anch'esso del diametro della gocciolina

A seguito del fatto che un integrale del genere è sostanzialmente irrisolvibile per tutti i diametri emessi da una persona la formula può essere discretizzata:

$$q_j = c_v \cdot p \cdot \sum_i N_{i,j} \cdot V_i \tag{4.3}$$

dove

- al prodotto $V_{br}N_{br}$ è stato sostituito il tasso polmonare $p$
- il pedice $j$ indica l'attività respiratoria in analisi ed è dunque collegato alle cariche virali emeese $q_j$ e alla concentrazione di *droplet* $N_{i,j}$
- il pedice $i$ della sommatoria indica la discretizzazione effettuata sui diametri. Tanto più fine sarà questa tanto maggiore il range di tale valore. In [53] si scelgono quattro categorie di diametri come si legge dalla figura 4.2 per cui $i = 1 \div 4$. Dalla categoria di diametri dipendono $N_{i,j}$ concentrazione e $V_i$ volume delle goccioline

Droplet concentrations ($N_i$, part. $cm^{-3}$) of the different size distribution channels during each expiratory activity measured by (Morawska et al., 2009).

| Expiratory activity | $D_1$ (0.80 µm) | $D_2$ (1.8 µm) | $D_3$ (3.5 µm) | $D_4$ (5.5 µm) |
|---|---|---|---|---|
| Whispered counting | 0.236 | 0.068 | 0.007 | 0.011 |
| Voiced counting | 0.110 | 0.014 | 0.004 | 0.002 |
| Speaking | 0.751 | 0.139 | 0.139 | 0.059 |
| Breathing | 0.084 | 0.009 | 0.003 | 0.002 |

Figura 4.2: Tabella concentrazione per quattro diametri. Immagine da [53]

Un'analisi approfondita di questo genere porta a risultati più coretti rispetto a ipotesi conservative o a regressioni lineari. Questi sono rappresentati in figura 4.3 e verranno effettivamente impiegati nei successivi calcoli. La comunità scientifica è d'accordo con il considerare questi valori accettabili, ma rimane ancora molta indecisione e dubbi che potranno essere scongiurati solo da futuri sviluppi e studi più approfonditi.

Quanta emission rates ($ER_q$) for a SARS-CoV-2 infected asymptomatic subject ($c_v$=$10^8$ copies $mL^{-1}$) as a function of the activity level and respiratory activity.

| Activity level | Respiratory activity | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Voiced counting | Whispered counting | Speaking | Breathing | Avg |
| Resting | 49.9 | 12.1 | 320 | 10.5 | 98.1 |
| Standing | 74.8 | 18.1 | 480 | 15.7 | 147 |
| Light exercise | 161 | 39.1 | $1.03\times10^3$ | 33.9 | 317 |

Figura 4.3: *Quanta* emessi per contagio da SARS-CoV-2. Immagine da [53]

## 4.2 Nuovi approcci e integrazioni

Sebbene il modello di Wells e Riley risalga al secolo scorso, questo è stato più volte rivisitato da studiosi moderni per ampliarne il campo di applicabilità. Un articolo molto famoso nel settore è quello di Gammaitoni e Nucci, in bibliografia [54]. Questo, alla luce delle ipotesi già riportate in 4.1.1 propone una formula migliorata che perde l'ipotesi di stazionarietà. Se ne vogliono dunque seguire i passaggi matematici della dimostrazione:

Si definisca $S$ il numero di persone suscettibili in un dato istante di tempo e $N$ il numero di cariche virali in ambiente in un dato istante di tempo. Si può scrivere

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{p}{V}NS \tag{4.4}$$

$$\frac{dN}{dt} = -CN + qI \tag{4.5}$$

dove $C$ è il tasso di ricambio d'aria equivalente. Questo è pari al numero di volumi ora immessi $[h^{-1}]$, ma viene coretto da alcuni valori come si leggerà meglio in seguito. $I$ è il numero di infetti iniziale. La (4.4) ci dice che il numero di persone suscettibili è in calo proporzionalmente alla quantità di carica virale in ambiente. La (4.5) ci indica che le cariche virali aumentano secondo $qI$ e diminuiscono secondo $C$. La risoluzione dei problemi di Cauchy con $S(0) = S_0 > 0$ e $N(0) = N_0 > 0$ riportano:

$$S(t, q, C) = S_0 \exp\left(-\frac{pIq}{V}\,\frac{Ct + e^{-Ct} - 1}{C^2}\right) \tag{4.6}$$

$$N(t, q, C) = \frac{qI}{C} + \left(N_0 - \frac{qI}{C}\right) e^{-Ct} \tag{4.7}$$

La probabilità di essere contagiati viene quindi definita come:

$$P_{infection} = \frac{C}{S_0} = \frac{S_0 - S}{S_0} = 1 - \frac{S}{S_0}$$

$$P_{infection} = 1 - \exp\left(-\frac{pIq}{V}\ \frac{Ct + e^{-Ct} - 1}{C^2}\right) \tag{4.8}$$

Comparando le formulazioni delle equazioni (4.1) e (4.8) si può vedere come le due siano molto simili, ma come il parametro temporale venga trattato in maniera più completa in questa seconda.

### 4.2.1 Il ricambio d'aria equivalente

Nelle precedenti dimostrazioni matematiche si è introdotto un parametro $C$. Questo è stato denominato *ricambio d'aria equivalente*. I ricambi d'aria sono dati dal rapporto della portata esterna immessa e il volume dell'ambiente secondo la formula:

$$\lambda = \frac{Q}{V}\left[\frac{m^3/h}{m^3} = \frac{1}{h}\right] \tag{4.9}$$

Come è già stato scritto alcune pagine addietro, è possibile introdurre all'interno di questo parametro l'efficacia della sezione di filtraggio delle UTA. Nel calcolo di $C$ dunque possono essere implementati allora alcuni effetti secondari che aumentano l'entità di riduzione del rischio di contagio per mezzo di modalità differenti dal semplice ricambio d'aria in ambiente. Questi vengono ampiamente descritti in [52] che li distingue in quattro categorie differenti:

- Ventilazione: rappresenta la quota parte di $C$ come calcolata in (4.9)
- Filtrazione: effetto delle sezioni di filtraggio dell'UTA, che catturano o inattivano parte del patogneo sospeso
- Deposizione: quota parte del virus che si appoggia sulle superfici in ambiente e che dunque perde infettività (per lo meno dal punto di vista airborne)
- Inattivazione: processo per il quale il virus perde l'infettività in ambiente per altri motivi

Segue:

$$C = \lambda_{ventilation} + k_{filtration} + k_{deposition} + k_{inactivation} \tag{4.10}$$

Il simbolo $\lambda$ è utilizzato per far notare che quello è il valore iniziale di ricambi d'aria ed è lo stesso in (4.9), ma che poi sarà corretto in $C$ per mezzo dei tre $k$ successivi. Seguono due formule sperimentali che possono essere impiegate per determinare i parametri $k$:

- $k_{filtration} = f_{HVAC}\dfrac{Q_{filter}\eta_{filter}}{V}$;

  Il primo fattore $f_{HVAC}$ rappresenta il tempo di funzionamento dell'impianto di ventilazione rispetto all'occupazione dell'ambiente e in caso di pandemia risulta pari ad 1 (ovvero tutti i sistemi sono sempre accesi quando nella stanza ci sono persone). La $Q_{filter}$ è la portata che attraversa la sezione di filtraggio e $\eta_{filter}$ è la sua efficienza. Infine $V$ è il volume dell'ambiente

- $k_{deposition} = \dfrac{0.108 d_p^2 \left(1 + \frac{0.166}{d_p}\right)}{H}$;

  Il valore di $d_p$ è il diametro aerodinamico della particella in analisi e $H$ è l'altezza dell'ambiente. Nel caso in cui nello studio si volesse prendere in considerazione la totalità dei diametri delle *droplets* emesse questa formula perderebbe di significato, oppure andrebbe effettuata una media

Il calcolo di $C$ in questa maniera ha come effetto quello di migliorare la situazione e di ridurre il rischio di contagio: poiché queste formule sono sperimentali e non hanno molto riscontro in letteratura si è deciso di mantenere una linea più dura e conservativa e, nei prossimi paragrafi non verrà effettuato l'aumento della portata d'aria esterna per mezzo di filtrazione e deposizione. In ogni caso si vuole riportare un esempio di calcolo. In figura 4.4 si raffrontano alcune situazioni di rischio di contagio per un'aula del Politecnico e si utilizzano le formule (4.1) (`WR Semplice`) e (4.8) con l'integrazione di (4.9) (`WR Complesso`). I casi affrontati sono molteplici, ma la loro descrizione è esplicativa e verranno comunque descritti in maniera più dettagliata successivamente. Si può notare come le barre arancioni sono ridotte rispetto a quelle verdi di un valore ridotto. Questa motivazione, con quelle già date, è a supporto del trascurare questa complicazione e procedere tramite l'utilizzo esclusivo della portata di ventilazione senza l'introduzione di altri parametri.

### 4.2.2 Altre formulazioni del rischio di contagio

In [53] viene proposta una seconda formulazione per il calcolo del rischio di contagio:

$$P_{infection} = 1 - \exp\left(-p \int_{t_i}^{t_f} n(t)dt\right) \tag{4.11}$$

dove con $n(t)$ si intende la concentrazione specifica di cariche virali in ambiente calcolata come:

$$n(t) = \frac{N(t)}{V}$$

Questa nuova versione risulta essere in definitiva la più versatile in quanto viene persa completamente la dipendenza dei periodi di permanenza di infetto e suscettibile e permette il calcolo di rischio di contagio anche per periodi parziali. La

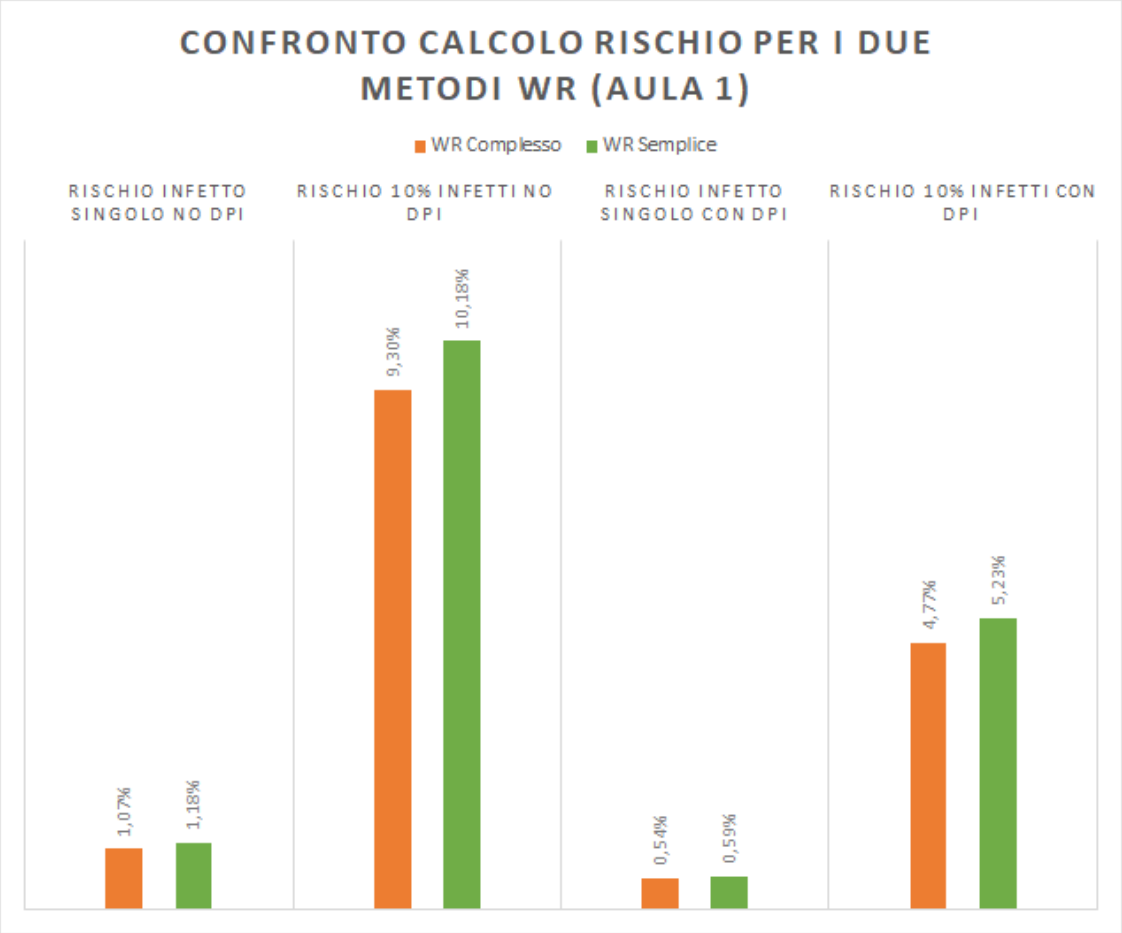



Figura 4.4: Raffronto rischio di contagio con due metodi diversi per un'aula del Politecnico

differenza tra (4.11) e (4.8) sta nel fatto che per la seconda non si è tenuto conto della transitorietà di $N$. Il valore delle cariche virali è infatti una funzione del tempo non solo crescente, ma anche decrescente. Nella dimostrazione iniziale la probabilità di contagio viene calcolata per un infetto e un suscettibile che entrano contemporaneamente in ambiente e vi restano per tutto il periodo in analisi. È questo il motivo per cui non vi compare mai il termine $N_0$. Laddove infatti si volesse chiarire appieno l'andamento di $N(t)$, come definito in (4.7), si dovrebbe spezzare la funzione in due sotto-funzioni:

$$N_p(t) = \frac{qI}{C}(1 - e^{-Ct}) \tag{4.12}$$

$$N_a(t) = N_p(t_0) \cdot e^{-C(t-t_0)} \tag{4.13}$$

Queste due nuove formulazioni indicano i due tratti di $N(t)$:

- $N_p(t)$ rappresenta la funzione *presenza* con l'ipotesi di $N_0 = 0$. Questo vuol significare che in ambiente non erano stati presenti infetti fino a $t = 0$, ma $I$ malati sono presenti durante il periodo in analisi
- $N_a(t)$, funzione *assenza*, è invece calcolata con l'ipotesi di $N_0 = N_p(t_0)$. L'infetto è ora uscito dall'ambiente, ma le cariche virali non si annullano istantaneamente. Queste hanno un andamento decrescente esponenziale, ottenuto tramite l'imposizione di $q = 0$ e lo *shift* temporale di $t - t_0$.

È chiaro come è possibile allo stesso modo rendere il tutto specifico rispetto al volume e determinare da $n(t)$ le funzioni $n_p(t)$ e $n_a(t)$. Queste funzioni sono rap-

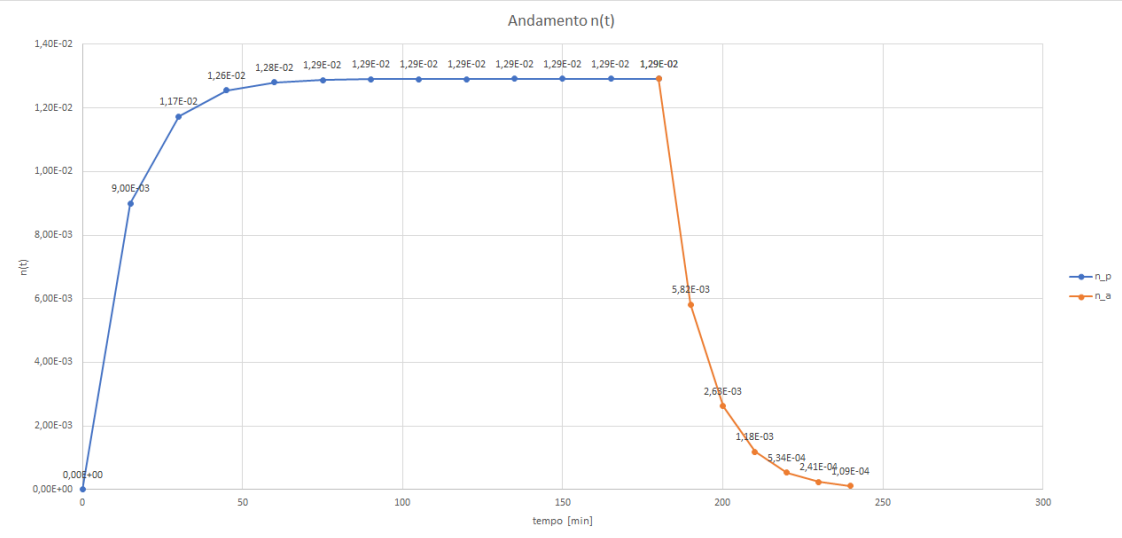



Figura 4.5: Andamento di $n(t)$ per un'aula del Politecnico

presentate chiaramente in figura 4.5. Nel caso raffigurato l'infetto e il suscettibile entrano in ambiente al tempo $t = 0$ e l'infetto esce al tempo $t_0 = 180$ minuti. È possibile dunque all'interno di $n_p(t)$ identificare due zone ben distinte:

- La prima zona è la crescita di concentrazione molto repentina per via dell'ingresso della persona infetta. In questo periodo iniziale il sistema di ventilazione non è in grado di raccogliere ed espellere tutte le cariche virali che stanno venendo emesse
- La seconda zona è invece un lungo *plateau*. Questo rappresenta la fine del transitorio iniziale e significa che si è raggiunta la concentrazione di equilibrio tra immissione di nuove cariche virali in ambiente ed espulsione per mezzo della diluizione perfetta dell'impianto di ventilazione

La funzione $n_a(t)$ è invece una semplice esponenziale decrescente, dipendente dall'efficienza di rimozione dell'impianto di ventilazione, come già facilmente intuibile

da (4.13).
Le espressioni del rischio di contagio possono, o meno, prendere in considerazione l'andamento a tratti della funzione $N(t)$. Quella presentata alla fine della dimostrazione (4.8) è il risultato della sostituzione di $n_p(t)$ in (4.11):

$$1 - \exp\left(-p\int_0^t n_p(t)dt\right) = 1 - \exp\left(-\frac{pIq}{V}\ \frac{Ct + e^{-Ct} - 1}{C^2}\right)$$

Se invece volessimo sostituire l'intera equazione a tratti ne verrebbe fuori una nuova formulazione:

$$P_{infection} = 1 - \exp\left(-\frac{pIq}{V}\frac{Ct + e^{-Ct} - 1 - \left(\frac{Cn_0}{qI}\right)e^{-Ct} + \left(\frac{Cn_0}{qI}\right)}{C^2}\right) \tag{4.14}$$

Quella presentata in (4.14) è una formulazione più completa, ma comunque limitante del rischio. Infatti sia per questa che per la prima il rischio è considerato nullo ad un tempo nullo. La versatilità della scelta dei tempi, estremi di integrazione, è il motivo per cui la formulazione integrale resta la migliore e sarà utilizzata nei calcoli che seguono.
Per riassumere:

$$n(t) = \begin{cases} n_p(t) & t \leq t_0 \\ n_a(t) & t > t_0 \end{cases} \tag{4.15}$$

## 4.3 Applicazioni alle aule del Politecnico

### 4.3.1 Scelta delle costanti di interesse

Nell'impiego dei modelli matematici descritti per un'applicazione ad un caso reale come quello delle aule del Politecnico, il primo passo fondamentale è quello della scelta dei parametri globale di interesse, che restano costanti per ogni aula e riguardano in primo luogo le grandezze comuni ad ogni ambiente. Questi non concernono infatti i valori che, ad esempio, possono essere trovati nella tabella alla figura 3.11: tali sono propri di ogni aula e verranno impiegati come variabili indipendenti nei fogli di calcolo associati. I parametri costanti sono invece:

1. Il valore della carica virale $q$. Come spiegato alla sezione 4.1.2 e in figura 4.3 questo è molto importante poiché una scelta errata minerebbe il modello nelle sue fondamenta. Si è scelto infine per i calcoli la media sulla riga, in tabella, per il livello di attività *resting* (a riposo). Questa scelta è avvalorata dal fatto che in aula durante una lezione la maggior parte degli studenti è seduta e i comportamenti respiratori possono variare molto spesso tra tutti quelli indicati (parlato a voce alta e bassa o silenzio). Tale valore è dunque riportato nell'ultima colonna e indica una $q = 98.1\ h^{-1}$. Le attività e i comportamenti

del professore possono essere invece sostanzialmente diversi (l'attività di parlato ad alta voce è sicuramente la principale, ma a seconda della modalità di insegnamento questo potrebbe prevedere sia la posizione seduta, che in piedi, che, in alcuni casi tra i più rari, anche un *light exercise* ovvero leggero esercizio). In ogni caso si è voluto trascurare l'effetto delle cariche virali immesse dal professore in ambiente poiché il caso in cui il docente risulti infetto è meno comune e più particolare

2. Il secondo parametro di cui si vuole parlare è l'effetto dell'utilizzo coretto dei dispositivi di protezione individuale. Questo può essere rappresentato da un dimezzamento netto delle cariche virali immesse in ambiente. Tale ipotesi è avvalorata da parte della comunità scientifica, ma restano ancora molti dubbi a riguardo. Per un'analisi come quella proposta in questo lavoro, tale considerazione mette insieme la necessità di semplicità e completezza. In ogni caso l'operazione di ridurre a metà le cariche virali ha un risultato molto simile al dimezzamento del rischio di contagio, come poi si potrà leggere dalle tabelle. Si può dunque concludere che $f_{DPI} = 0.5$ e $q_{DPI} \approx 50\ h^{-1}$

3. Un altro parametro di importanza cruciale è il tasso polmonare. Questo può essere ritrovato su numerosi *handbook* e manuali, nonché in articoli scientifici di interesse sotto il nome inglese di *Inhalation Rate* `IR` [55–57]. Questo, come le cariche virali emesse nell'unità di tempo, può essere molto variabile a seconda dell'attività e del comportamento respiratorio, nonché dell'eventuale presenza di contagi in corso. Difatti se il valore di $q$ è proprio di ogni malattia e dunque caratteristico di persone infette, la presenza di un patogeno in circolo potrebbe invece influenzare positivamente o negativamente la quantità di aria esalata. Si considera per semplicità e alla luce dell'enorme quantità di dati in archivio presenti il caso di un maschio adulto sano che assume un comportamento simile a quello proposto per il valore di $q$ e si ottiene, cercando di accomunare quante più fonti possibile, un valore numerico di circa $p = 0.6\ m^3/h$

4. Infine in questo elenco si vogliono inserire anche le scelte effettuate per quello che riguarda i tempi di permanenza della persona malata. Questo infatti è considerato durante tutta l'analisi una costante, al contrario della permanenza del suscettibile sano che invece è stata fatta variare per poter comprendere più scenari possibili. Al Politecnico di Torino la durata delle lezioni è solitamente di 90 o 180 minuti, con la necessità di piccole pause nel mezzo. Di conseguenza per simulare la situazione peggiore si è deciso che l'infetto rimanesse costantemente in aula per la totalità della durata della lezione di $3h$. Verranno poi descritti e impiegati diversi $\tau$ di scaglionamento per la permanenza dei sani

| q_Max [1/h] | Effetto Mascherina_ f_DPI | q_DPI. [1/h] | Tasso Respirazione [m3/h] | Permanenza in aula infetto [h] |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 0,5 | 50 | 0,6 | 3 |

Figura 4.6: Costanti del metodo nel foglio elettronico

### 4.3.2 Le variabili per ogni aula

I valori variabili vengono definiti per due categorie: le aule ed il tempo. La tabella a doppia entrata che segue porterà dunque sulle righe il tempo in minuti per indicare efficacemente l'istante in analisi e sulle colonne invece le aule. Per queste ultime i parametri di interesse sono:

1. Il nome o il codice identificativo che chiarisce univocamente l'ambiente in analisi. Non si voglia confondere le aule con le UTA: è possibile, come già evidenziato in precedenza, che alcune stanze siano asservite da una stessa macchina, ma è del tutto impossibile che una stessa aula sia asservita da due UTA differenti. Nel caso degli ambienti si sono già operate le divisioni e le medie ponderate necessarie per suddividere le portate di aria esterna in base alla volumetria nel caso di sistemi *multizona*

2. Il numero di posti e posti COVID è riportato come in figura 3.11 ed è importante anche nell'analisi in quanto uno delle situazioni è dipendente dal profilo di occupazione dell'aula

3. Sono riportate anche le portate d'aria esterna reale e nominale: non si è voluto effettuare il caso di rischio da contagio con l'utilizzo della portata nominale in quanto, come già spiegato, tale valore perde tendenzialmente di significato all'atto pratico di funzionamento delle UTA e dunque la portata misurata è un valore molto più preciso di importanza sperimentale

4. Si indica la metratura quadra complessiva per ogni ambiente e la sua altezza. Questi valori asservono unicamente al calcolo del volume, parametro invece estremamente importante poiché rientra all'interno delle formule del calcolo di rischio di contagio e cariche virali in ambiente

5. Infine si introduce il parametro $C$. Questo è considerato senza le correzioni per il filtraggio, la deposizione e l'inattivazione, ma è semplicemente calcolato per mezzo di portata e volume come indicato in 4.9. Se nella formula in riferimento questo era chiamato $\lambda$ è solo una questione di nomenclatura locale della sezione per il differimento con $C$ e i $k$. È chiaro come, laddove $k_i = 0 \; \forall \; i$ valga dunque l'identità $\lambda = C$

| AULA | POSTI | POSTI COVID | PORTATA NOMINALE [m3/h] | PORTATA ESTERNA [m3/h] | Superficie [m2] | Altezza | Volume [m3] | Volumi orari [vol/h] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 362 | 91 | 10.440 | 7600 | 318,11 | 5 | 1591 | 4,78 |
| 3 | 352 | 88 | 10.440 | 7600 | 316,69 | 5 | 1583 | 4,80 |
| 5 | 362 | 91 | 10.440 | 7600 | 319,10 | 5 | 1596 | 4,76 |
| 2 | 332 | 83 | 10.000 | 9560 | 295,92 | 5 | 1480 | 6,46 |
| 4 | 326 | 82 | 10.000 | 9560 | 285,26 | 5 | 1426 | 6,70 |
| 6 | 302 | 76 | 10.000 | 7700 | 254,89 | 5 | 1274 | 6,04 |
| 7 | 148 | 37 | 5000 | 3430 | 132,43 | 3,55 | 470 | 7,30 |
| 8 | 279 | 70 | 9.000 | 5600 | 214,61 | 3,55 | 762 | 7,35 |
| 10 | 140 | 35 | 7.000 | 6450 | 145,04 | 5 | 725 | 8,89 |
| 12 | 285 | 71 | 8.000 | 4300 | 256,38 | 3,55 | 910 | 4,72 |
| 14 | 176 | 44 | 7.000 | 6480 | 175,84 | 5 | 879 | 7,37 |
| 16 | 195 | 49 | 7.500 | 5300 | 191,12 | 3,55 | 678 | 7,81 |
| 10A | 252 | 63 | 10.000 | *7440* | 270,01 | 5 | 1350 | 5,51 |
| 12A | 252 | 63 | 10.000 | *7440* | 265,82 | 5 | 1329 | 5,60 |
| 1S | 156 | 39 | *5.000* | 3710 | 163,12 | 3,55 | 579 | 6,41 |
| 3S | 156 | 39 | *5.000* | 3580 | 163,13 | 3,55 | 579 | 6,18 |
| 5S | 156 | 39 | *5.000* | 3580 | 163,13 | 3,55 | 579 | 6,18 |
| 7S | 156 | 39 | *5.000* | 2650 | 163,13 | 3,55 | 579 | 4,58 |
| 9S | 72 | 18 | *5.000* | 2500 | 83,25 | 3,55 | 296 | 8,46 |
| 11S | 72 | 18 | *5.000* | 2500 | 78,80 | 3,55 | 280 | 8,94 |
| 27 | 221 | 55 | 5.000 | 4800 | 190,96 | 3,55 | 678 | 7,08 |
| 29 | 213 | 53 | 5.000 | 4800 | 190,54 | 3,55 | 676 | 7,10 |
| 27B | 221 | 55 | 5.000 | 4800 | 196,44 | 3,55 | 697 | 6,88 |
| 29B | 213 | 53 | 5.000 | 4800 | 190,74 | 3,55 | 677 | 7,09 |

Figura 4.7: Parametri variabili per aula nel foglio elettronico

### 4.3.3 Calcolo delle funzioni di rischio

Alla luce dei valori ottenuti e dei ragionamenti effettuati è infine possibile calcolare il rischio di contagio in ogni ambiente. Si distinguono quattro situazioni per cui l'intero modello è applicato:

1. **Infetto Singolo No DPI**
   Questo è il primo caso studiato e rappresenta una delle situazioni più comuni: in aula è presenta una persona malata che non usa le protezioni individuali. Ciò impone un $I = 1$ che dunque si annulla dalla maggior parte delle formule presentate. Il non utilizzo dei DPI invece significa $q \approx 100\ h^{-1}$

2. **10% Infetti no DPI**
   Questo secondo caso è invece la situazione indubbiamente peggiore. Come si può intendere dal titoletto si vuole simulare la presenza di infetti al 10% dell'occupazione. Il numero di posti è limitati ai `posti COVID` ed è dunque già di per sè il 25% del massimo consentito. Sebbene queste situazione sia indubbiamente poco probabile si vuole anche indicare una posizione più conservativa: in ogni caso è plausibile la presenza di asintomatici che si contagino a vicenda con il percorrersi delle lezioni

3. **Infetto Singolo + DPI**
   La situazione in analisi in questo terzo punto è invece la più comune: si ha una sola persona malata in ambiente ed è imposto l'utilizzo di dispositivi di protezione individuale

4. **10% Infetti + DPI**
   Questo ultimo è invece per completezza e per capire a fondo come potrebbe andare il rischio di contagio in concomitanza di alta presenza di persone malate, ma che usano correttamente i DPI messi a disposizione

Il primo passo è dunque il calcolo delle cariche virali. Questo è effettuato per mezzo delle formule già indicate ed è funzione della permanenza in aula dell'infetto, scelta pari a 3 ore. In figura 4.8 è rappresentato l'andamento della concentrazione di cariche virali in un ambiente del Politecnico. Si nota la forte similitudine con la figura già presentata 4.5. Come è facilmente intuibile il caso peggiore è rappresentato dalla linea arancione collegata alla presenza di un 10% di infetti e in assenza di utilizzo di DPI. Un documento più completo può essere invece quello rappresentato in figura 4.9. Questo è indice dei picchi di compresenza di cariche per ogni aula ed è dunque rappresentativo della totalità degli ambienti. Come si vedrà in seguito i picchi di questo grafico sono anche molto indicativi delle situazioni peggiori a livello di rischio di contagio.

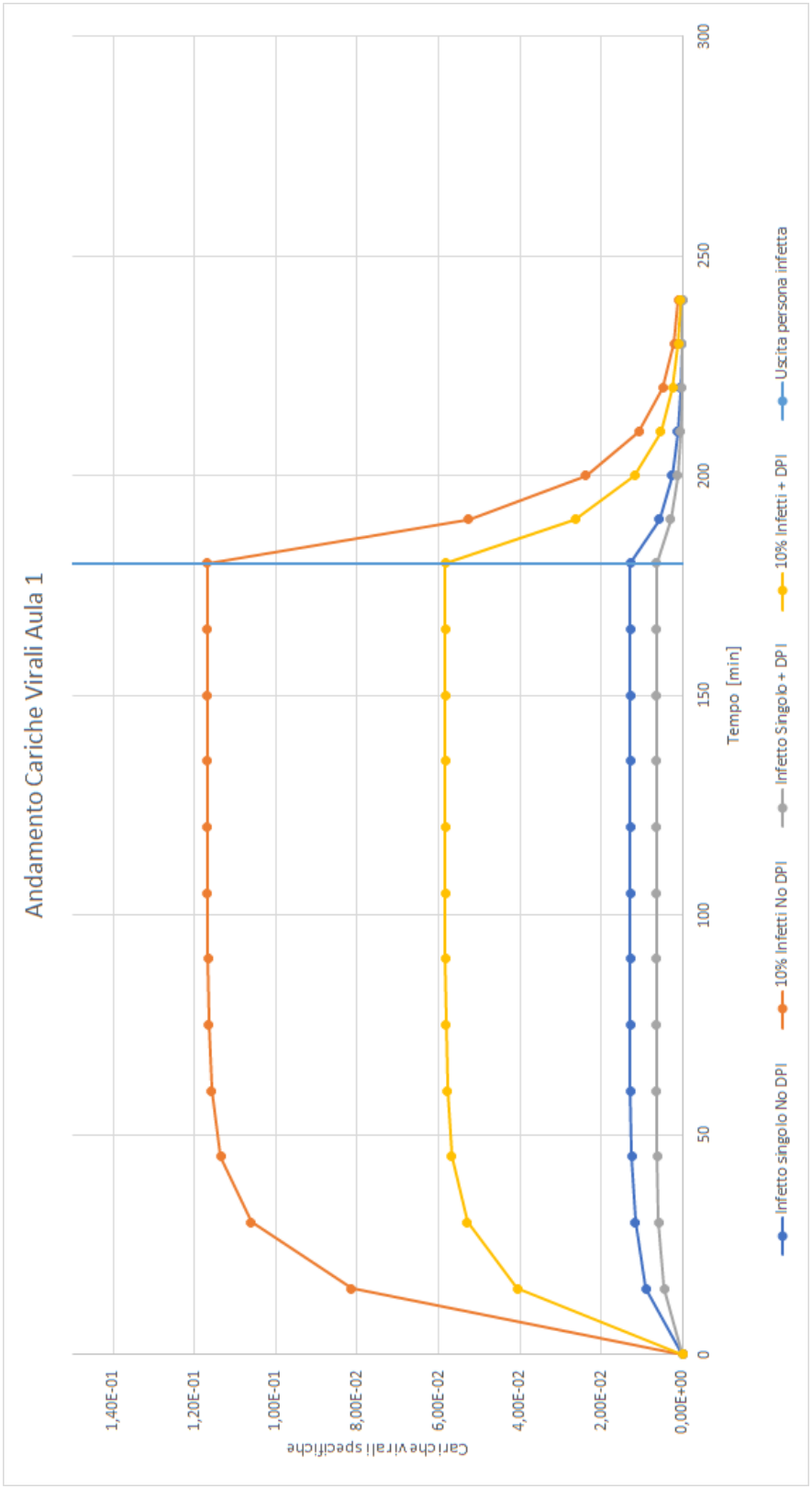



Figura 4.8: Andamento concentrazione cariche virali in ambiente per un'aula del Politecnico

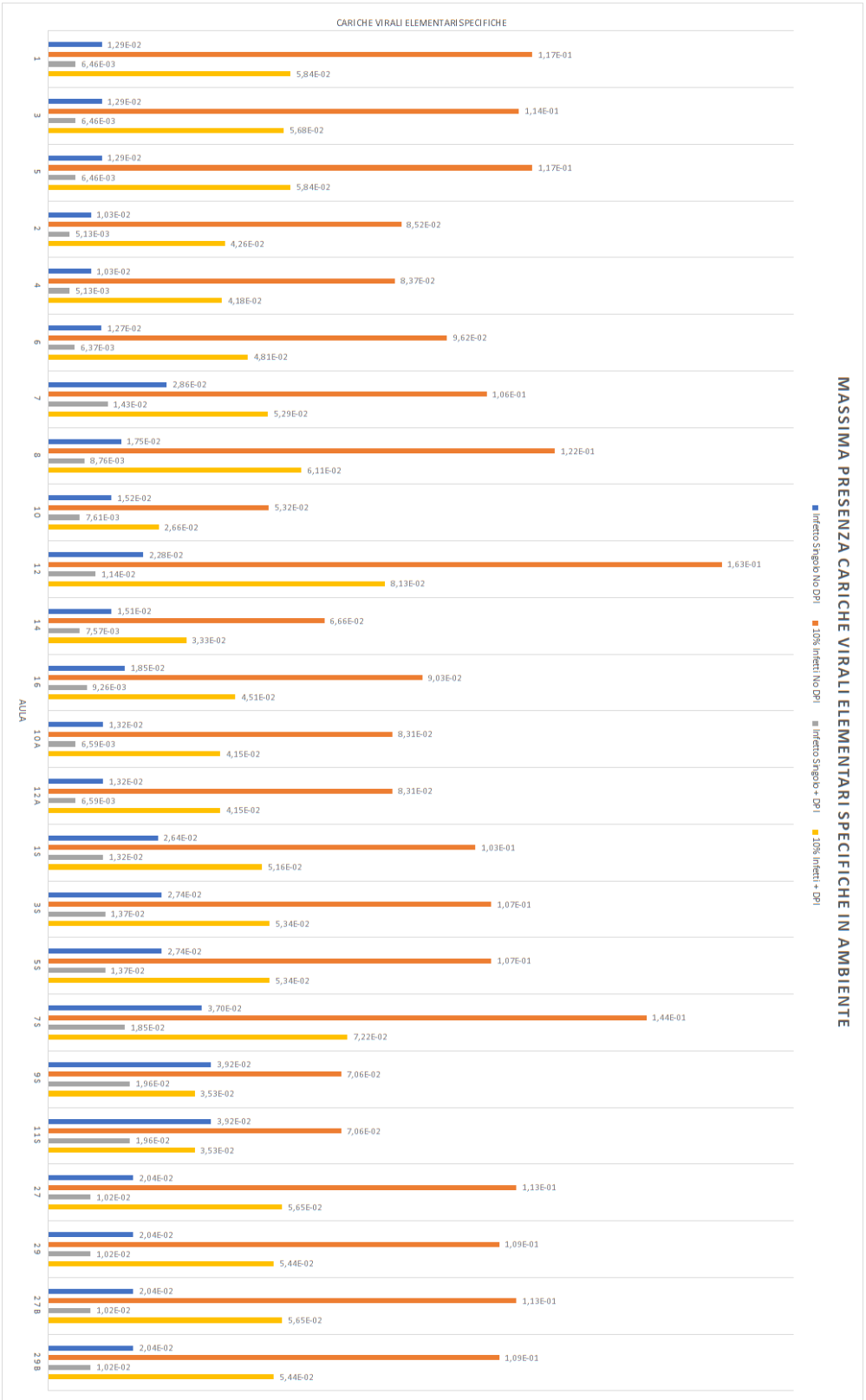



Figura 4.9: Massime cariche virali presenti in ambiente per ogni aula e situazione

Una volta determinato il valore di $n(t)$ per ogni aula per ogni istante di tempo si procede all'applicazione della formula:

$$R(t) = 1 - \exp\left(-p \int_{t_0}^{t} n(\tau) d\tau\right) \tag{4.16}$$

Nel foglio elettronico l'operazione di integrazione è effettuata secondo il metodo dei trapezi. Questo è calcolato in due situazioni diverse:

1. **Permanenza suscettibile di 4 ore**
   Se l'infetto resto costantemente in aula per 3 ore come già definito nel preambolo, il suscettibile detta gli estremi di integrazione di (4.16). Nel caso in questione:
   $$t_0 = 0$$
   $$0 \leq t \leq 240\ min$$
   Si è voluto mantenere il sano per un'ora oltre la permanenza del malato per evidenziare come il rischio crescesse anche dopo che questo ha abbandonato la stanza. La crescita è ovviamente leggerissima e non impatta in maniera eccessiva il calcolo complessivo

2. **Permanenza suscettibile 30 minuti**
   Questo secondo caso è indicativo di come varia il rischio a seconda del momento di ingresso del sano in ambiente. Gli estremi di integrazione si modificano leggermente poiché si impone:
   $$t_0(t, \tau) = t - \tau$$
   $$\tau \leq t \leq 240\ min$$
   con $\tau = 30\ min$.
   Ciò significa che la funzione $R(t, \tau)$ tiene conto del tempo di uscita del sano dall'ambiente $t$, il quale vi è rimasto per un tempo di $\tau$ minuti precedenti

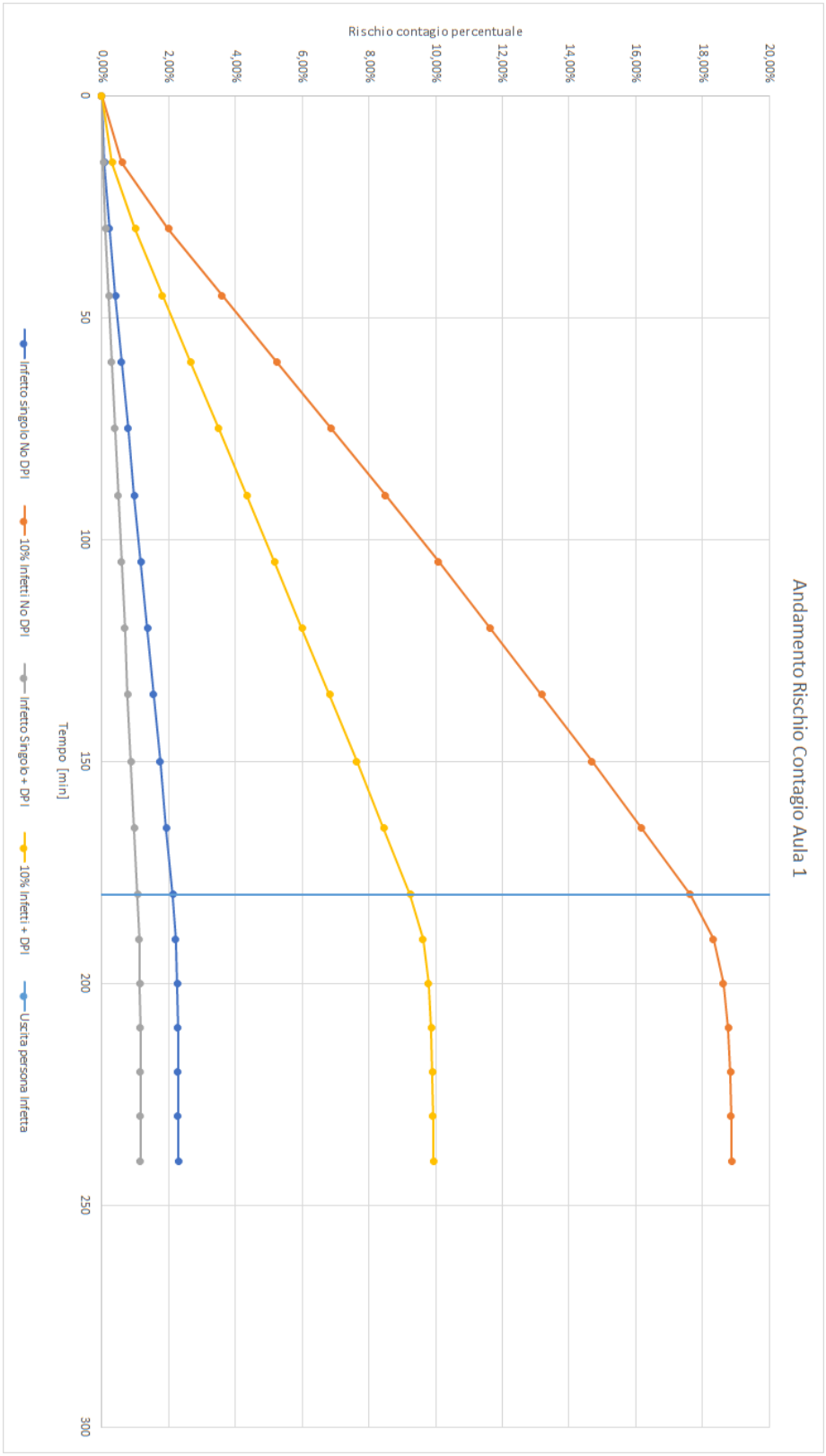



Figura 4.10: Andamento rischio di contagio per un'aula del Politecnico

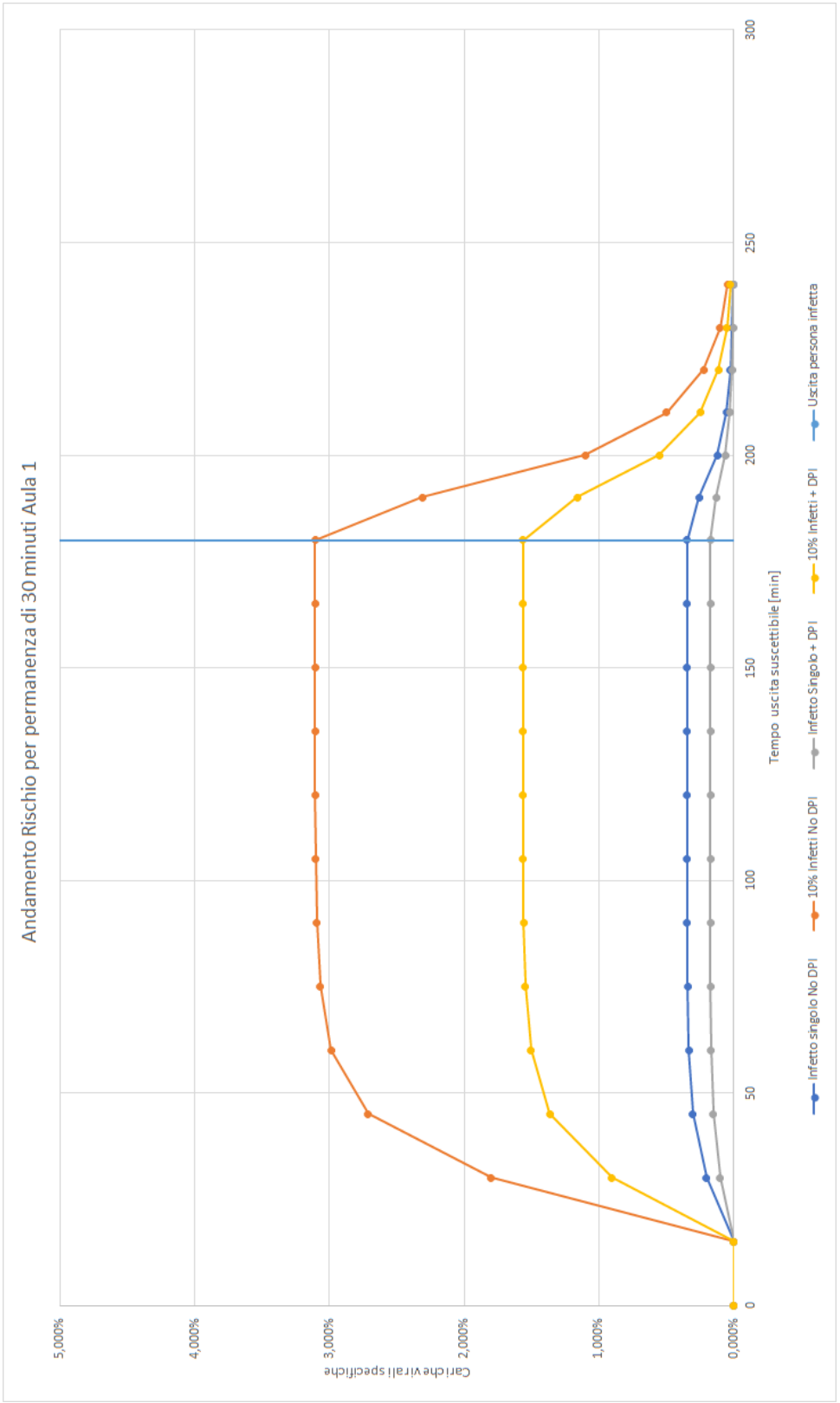
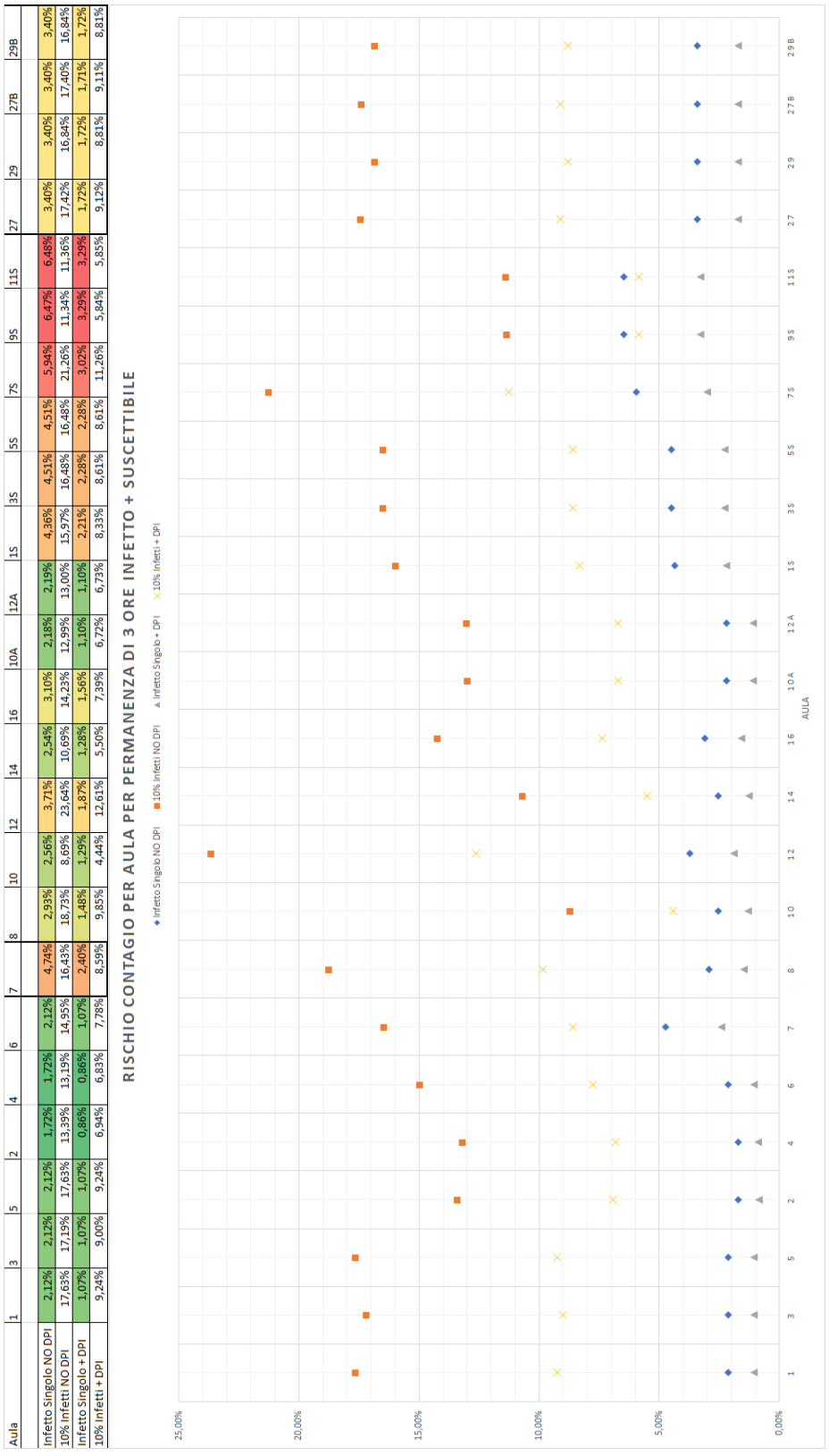



Figura 4.11: Andamento rischio di contagio per una permanenza di 30 minuti per un'aula del Politecnico

Le figure 4.10 e 4.11 sono rappresentative dei due casi presentati. La prima delle due indica il rischio cumulativo per permanenze di un sano che entra in contemporanea di un infetto ed esce al tempo in ascissa. Come si può notare il rischio cresce quasi linearmente per tutta la compresenza dei due soggetti per poi assestarsi dopo l'uscita della persona malata (segnalata dalla retta verticale azzurra e dovuta all'arresto di generazione di nuove cariche virali). La piccola crescita che si ha dopo tale evento è a seguito della discrepanza temporale tra l'uscita dell'infetto e l'annullamento delle cariche virali in ambiente per mezzo dell'impianto di ventilazione. Poiché tale grafico potrebbe risultare contro-intuitivo in quanto il valore numerico del rischio è così alto anche dopo che il soggetto contagiato è uscito si è pensato di proporre l'integrazione con la figura successiva. In questa è invece chiaro come questo può anche essere molto variabile con la permanenza $\tau$ del soggetto. In ascissa possiamo ritrovare il tempo di uscita della persona sana. Questo grafico è molto simile a quello di figura 4.8, ma solamente spostato verso destra per tutta la parte relativa alla funzione $n_p(t)$, ovvero i primi 180 minuti. È chiaro infatti come il rischio cresca se il soggetto entra in ambiente nei primi tempi in cui le cariche stanno aumentando, ma resti sostanzialmente costante se questo vi rimanga per una durata inclusa nel periodo di *plateau* delle cariche virali. Si annulla invece molto rapidamente a destra della retta verticale azzurra.
Infine si riportano i risultati complessivi di calcolo di rischio per tutte le aule per ogni situazione. Il valore in tabella alla figura 4.12 è quello relativo ad una permanenza contemporanea di sano e malato per 3 ore.



| Aula | 1 | 3 | 5 | 2 | 4 | 6 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 10A | 12A | 1S | 3S | 5S | 7S | 9S | 11S | 27 | 29 | 27B | 29B | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Infetto Singolo NO DPI | 2,12% | 2,12% | 2,12% | 1,72% | 1,72% | 2,12% | 4,74% | 2,93% | 2,56% | 3,71% | 2,54% | 3,10% | 2,18% | 2,19% | 4,36% | 4,51% | 4,51% | 5,94% | 6,47% | 6,48% | 3,40% | 3,40% | 3,40% | 3,40% | 3,40% |
| 10% Infetti NO DPI | 17,63% | 17,19% | 17,63% | 13,39% | 13,19% | 14,95% | 16,43% | 18,73% | 8,69% | 23,64% | 10,69% | 14,23% | 12,99% | 13,00% | 15,97% | 16,48% | 16,48% | 21,26% | 11,34% | 11,36% | 17,42% | 16,84% | 17,40% | 16,84% | 16,84% |
| Infetto Singolo + DPI | 1,07% | 1,07% | 1,07% | 0,86% | 0,86% | 1,07% | 2,40% | 1,48% | 1,29% | 1,87% | 1,28% | 1,56% | 1,10% | 1,10% | 2,21% | 2,28% | 2,28% | 3,02% | 3,29% | 3,29% | 1,72% | 1,72% | 1,71% | 1,72% | 1,72% |
| 10% Infetti + DPI | 9,24% | 9,00% | 9,24% | 6,94% | 6,83% | 7,78% | 8,59% | 9,85% | 4,44% | 12,61% | 5,50% | 7,39% | 6,72% | 6,73% | 8,33% | 8,61% | 8,61% | 11,26% | 5,84% | 5,85% | 9,12% | 8,81% | 9,11% | 8,81% | 8,81% |



Figura 4.12: Andamento del rischio di contagio per ogni aula e situazione per la sede centrale del Politecnico di Torino

## 4.4 Risultati e conclusioni

In questa ultima sezione del capitolo si vogliono leggere con occhio critico i numeri proposti dalla figura 4.12 per analizzarne i diversi risultati e conseguenze.
Ad una prima occhiata, grazie anche alla formattazione condizionale del foglio elettronico, la prima risposta che viene data è che le aule `7s`, `9s` e `11s` sono quelle che versano in condizioni peggiori e che hanno necessità di interventi repentini e immediati. Questo consegue dal fatto che il metodo propone un rischio più alto, non per le aule con meno ricambi aria (come si vedrà in seguito infatti questi ambienti risulterebbero molto buoni secondi approcci alternativi), ma bensì per quelle più piccole. Questo ci dice che l'effetto sul rischio del volume delle stanze è maggiore di quello della ventilazione. Dunque in un'aula che ha sì più ricambi volumici orari, ma risulta sostanzialmente più piccola ho un rischio più alto che in una seconda dove i ricambi aria sono minori, ma il volume è molto più grande. Questo punto può indicare in prima battuta una debolezza del modello: la distribuzione delle cariche virali è infatti supposta perfettamente omogenea in tutto l'ambiente. Ciò, laddove venisse opinato, invaliderebbe i risultati finali. Questi valori possono quindi essere presi come riferimento, ma in ambienti di dimensioni estremamente elevate come grandi aule universitarie il metodo perde, a parere di chi scrive, di efficacia. Si vuole comunque sottolineare come le portate d'aria esterna negli ambienti indicati in rosso dalla tabella siano sostanzialmente minori di quelle nominali. Il che indica in ogni caso una situazione patologica che va risolta prima di permettere l'ingresso in ambiente agli studenti e docenti.
Se si volesse mantenere il rischio di contagio tra l'1% e il 2% per una situazione di infetto singolo e utilizzo di DPI (che risulta ad oggi quella più indicata e comune), la maggior parte delle aule potrebbero essere impiegate. Sono invece molto poche quelle che scendono al di sotto del punto percentuale. Tutto il blocco sotterraneo di aule S riporta dei rischi $\geq 2\%$ il che indica la necessità di interventi mirati. Come si leggerà nelle prossime sottosezioni però, tali valori percentuali non descrivono appieno la situazione di pericolosità che viene rappresentata in maniera più completa dal parametro $R_0$.

### 4.4.1 Rispetto dei requisiti minimi

Prima di procedere con l'analisi del numero di riproduzione base $R_0$ si vuole descrivere alcuni requisiti minimi che potrebbero in primo luogo rappresentare lo stato della situazione di rischio a monte dell'intero metodo. I numeri ottenuti evidenziano una situazione patologica solo per alcuni ambienti ben definiti. Questi hanno portate d'aria esterna misurata tendenzialmente molto minore di quella nominale ed hanno quindi problemi di ricambi orari. Dai rapporti ISS e dalle pubblicazioni AICARR vengono fuori dei valori minimi per questi parametri:

1. L'Istituto Superiore della Sanità (ISS) [3,48] consiglia una portata d'aria esterna minima a persona di 25.2 $[l/s \cdot pers]$, contrariamente al valore richiesto normalmente in situazione di "non-pandemia" di $\approx 6$ $[l/s \cdot pers]$

2. Altri studi suggeriscono invece di garantire un lavaggio completo degli ambienti ogni 10 $min$ il che consegue ad una volumetria oraria di 6 $[vol/h]$

Questi due requisiti vanno a toccare due aspetti diversi dell'impianto di climatizzazione e della sua gestione: infatti laddove il primo può essere sostanzialmente modificato dall'occupazione dell'aula, riducendone il numero di presenti e dunque aumentando in maniera semplice la portata prevista per ogni individuo, il secondo agisce sulle UTA stesse, incentivando ulteriormente l'aumento massimo di immissione di aria fresca. Il rispetto di questa seconda indicazione può dover comportare sostanziali modifiche agli impianti e inoltre non tiene conto dell'occupazione degli ambienti che invece risulta molto importante. Segue una rappresentazione grafica della situazione del Politecnico secondo i due requisiti proposti, tramite la tabella già riportata in figura 4.7. Dalla tale rappresentazione (fig.4.13) viene evidenzia-

| AULA | POSTI | POSTI COVID (25%) | PORTATA NOMINALE [m3/h] | PORTATA ESTERNA [m3/h] | Superficie [m2] | Altezza | Volume [m3] | Volumi orari [vol/h] | PORTATA A PERSONA | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | POSTI COVID | POSTI |
| 1 | 362 | 91 | 10.440 | 7600 | 318,11 | 5 | 1591 | 4,78 | 23,33 | 5,83 |
| 3 | 352 | 88 | 10.440 | 7600 | 316,69 | 5 | 1583 | 4,80 | 23,99 | 6,00 |
| 5 | 362 | 91 | 10.440 | 7600 | 319,10 | 5 | 1596 | 4,76 | 23,33 | 5,83 |
| 2 | 332 | 83 | 10.000 | 9560 | 295,92 | 5 | 1480 | 6,46 | 31,99 | 8,00 |
| 4 | 326 | 82 | 10.000 | 9560 | 285,26 | 5 | 1426 | 6,70 | 32,58 | 8,15 |
| 6 | 302 | 76 | 10.000 | 7700 | 254,89 | 5 | 1274 | 6,04 | 28,33 | 7,08 |
| 7 | 148 | 37 | 5000 | 3430 | 132,43 | 3,55 | 470 | 7,30 | 25,75 | 6,44 |
| 8 | 279 | 70 | 9.000 | 5600 | 214,61 | 3,55 | 762 | 7,35 | 22,30 | 5,58 |
| 10 | 140 | 35 | 7.000 | 6450 | 145,04 | 5 | 725 | 8,89 | 51,19 | 12,80 |
| 12 | 285 | 71 | 8.000 | 4300 | 256,38 | 3,55 | 910 | 4,72 | 16,76 | 4,19 |
| 14 | 176 | 44 | 7.000 | 6480 | 175,84 | 5 | 879 | 7,37 | 40,91 | 10,23 |
| 16 | 195 | 49 | 7.500 | 5300 | 191,12 | 3,55 | 678 | 7,81 | 30,20 | 7,55 |
| 10A | 252 | 63 | 10.000 | *7440* | 270,01 | 5 | 1350 | 5,51 | 32,80 | 8,20 |
| 12A | 252 | 63 | 10.000 | *7440* | 265,82 | 5 | 1329 | 5,60 | 32,80 | 8,20 |
| 1S | 156 | 39 | *5.000* | 3710 | 163,12 | 3,55 | 579 | 6,41 | 26,42 | 6,61 |
| 3S | 156 | 39 | *5.000* | 3580 | 163,13 | 3,55 | 579 | 6,18 | 25,50 | 6,37 |
| 5S | 156 | 39 | *5.000* | 3580 | 163,13 | 3,55 | 579 | 6,18 | 25,50 | 6,37 |
| 7S | 156 | 39 | *5.000* | 2650 | 163,13 | 3,55 | 579 | 4,58 | 18,87 | 4,72 |
| 9S | 72 | 18 | *5.000* | 2500 | 83,25 | 3,55 | 296 | 8,46 | 38,58 | 9,65 |
| 11S | 72 | 18 | *5.000* | 2500 | 78,80 | 3,55 | 280 | 8,94 | 38,58 | 9,65 |
| 27 | 221 | 55 | 5.000 | 4800 | 190,96 | 3,55 | 678 | 7,08 | 24,13 | 6,03 |
| 29 | 213 | 53 | 5.000 | 4800 | 190,54 | 3,55 | 676 | 7,10 | 25,04 | 6,26 |
| 27B | 221 | 55 | 5.000 | 4800 | 196,44 | 3,55 | 697 | 6,88 | 24,13 | 6,03 |
| 29B | 213 | 53 | 5.000 | 4800 | 190,74 | 3,55 | 677 | 7,09 | 90,14 | 6,26 |

Figura 4.13: Rispetto dei requisiti minimi di portata aria esterna

to immediatamente il punto critico già presentato: i requisiti infatti non vengono rispettati nella totalità dei casi in occupazione completa (già prevedibile poiché il dimensionamento degli impianti è stato effettuato con il valore normale e non corretto per la pandemia) e per lo più nei grandi ambienti o in particolarissime situazioni patologiche (`aule 1, 3 e 5` e `aula 7s`). Questi valori poveri di portata esterna però non vengono assolutamente rispecchiati nelle percentuali di rischio del modello, che infatti indica per i primi tre ambienti una probabilità di poco sopra il

punto percentuale (e dunque appieno nei limiti nominali).
I due requisiti proposti nel punto elenco possono rappresentare già di per sé una buona metodologia di discriminazione per ambienti che versano in pessime condizioni. Nello specifico il rispetto del primo dei due è già indice di un'ottima preparazione per la pandemia. Non si vuole dimenticare come in prima battuta restano le precauzioni di distanziamento sociale e comportamento respiratorio e igienico le migliori armi per combattere la diffusione del contagio.

### 4.4.2 Numero di riproduzione di base

Il parametro che, a parere di chi scrive, è però meglio rappresentativo della situazione completa del rischio di contagio, nonché quello su cui si possono basare i ragionamenti successivi per interventi specifici o interdizione di ambienti è il numero di riproduzione di base $R_0$. Questo è ottenuto molto semplicemente:

$$R_0 = P_i \cdot n_O \tag{4.17}$$

dove:

- $R_0$ è il numero di riproduzione di base e indica in maniera approssimata i contagi secondari, ovvero il numero di persone infettate da un singolo individuo. Questo può essere definito globalmente se la popolazione statistica è sufficientemente grande (ad esempio su base nazionale) oppure localmente in ambienti ben definiti
- $P_i$ è il rischio di contagio come calcolato nella sezione precedente e riportato in tabella
- $n_O$ è il numero di occupanti di un ambiente, laddove appunto tale valore volesse essere calcolato localmente

La formula (4.17) può essere quindi applicata ad ogni aula per diversi profili di occupazione e i dati possono essere riportati, per ogni situazione, in una tabella a doppia entrata.

| Aula | 1 | 3 | 5 | 2 | 4 | 6 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 10A | 12A | 1S | 3S | 5S | 7S | 9S | 11S | 27 | 29 | 27B | 29B | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Portata | 7600 | 7600 | 7600 | 9560 | 9560 | 7700 | 3430 | 5600 | 6450 | 4300 | 6480 | 5300 | 7440 | 7440 | 3710 | 3580 | 3580 | 2650 | 2500 | 2500 | 4800 | 4800 | 4800 | 4800 | |
| Posti totali | 362 | 352 | 362 | 332 | 326 | 302 | 148 | 279 | 140 | 285 | 176 | 195 | 252 | 252 | 156 | 156 | 156 | 156 | 72 | 72 | 221 | 213 | 221 | 213 | |
| Infetto Singolo NO DPI | 2,25% | 2,25% | 2,25% | 1,81% | 1,81% | 2,24% | 4,97% | 3,07% | 2,67% | 3,95% | 2,66% | 3,24% | 2,31% | 2,31% | 4,59% | 4,75% | 4,75% | 6,32% | 6,75% | 6,76% | 3,57% | 3,57% | 3,57% | 3,57% | |
| 10% Infetti NO DPI | 18,64% | 18,17% | 18,63% | 14,05% | 13,82% | 15,70% | 17,17% | 19,55% | 9,05% | 24,94% | 11,19% | 14,85% | 13,69% | 13,70% | 16,75% | 17,30% | 17,30% | 22,47% | 11,83% | 11,83% | 18,21% | 17,61% | 18,20% | 17,61% | |
| Infetto Singolo + DPI | 1,13% | 1,13% | 1,13% | 0,91% | 0,91% | 1,13% | 2,51% | 1,55% | 1,35% | 1,99% | 1,34% | 1,64% | 1,16% | 1,16% | 2,32% | 2,41% | 2,41% | 3,21% | 3,44% | 3,44% | 1,80% | 1,80% | 1,80% | 1,80% | |
| 10% Infetti + DPI | 9,80% | 9,54% | 9,80% | 7,29% | 7,17% | 8,19% | 8,99% | 10,31% | 4,63% | 13,36% | 5,76% | 7,72% | 7,10% | 7,10% | 8,76% | 9,06% | 9,06% | 11,95% | 6,10% | 6,10% | 9,56% | 9,23% | 9,56% | 9,23% | |
| 10% | 0,410151 | 0,398888 | 0,410108 | 0,301505 | 0,296204 | 0,339766 | 0,372101 | 0,431791 | 0,188498 | 0,568022 | 0,235648 | 0,318876 | 0,292806 | 0,292911 | 0,362407 | 0,375196 | 0,375196 | 0,500804 | 0,24742 | 0,247459 | 0,398375 | 0,383963 | 0,398254 | 0,383959 | 100% |
| 15% | 0,615226 | 0,59832 | 0,615162 | 0,452258 | 0,444306 | 0,50965 | 0,558152 | 0,647686 | 0,282747 | 0,852033 | 0,353472 | 0,478314 | 0,439209 | 0,439367 | 0,54361 | 0,562795 | 0,562795 | 0,751205 | 0,371129 | 0,371188 | 0,597563 | 0,575945 | 0,597381 | 0,575939 | 100% |
| 20% | 0,820302 | 0,79776 | 0,820216 | 0,60301 | 0,592408 | 0,679533 | 0,744202 | 0,863581 | 0,376995 | 1,136043 | 0,471296 | 0,637752 | 0,585612 | 0,585822 | 0,724814 | 0,750393 | 0,750393 | 1,001607 | 0,494839 | 0,494918 | 0,796751 | 0,767926 | 0,796507 | 0,767918 | 92% |
| 25% | 1,025377 | 0,997201 | 1,02527 | 0,753763 | 0,74051 | 0,849416 | 0,930253 | 1,079477 | 0,471244 | 1,420054 | 0,58912 | 0,79719 | 0,732014 | 0,732278 | 0,906017 | 0,937991 | 0,937991 | 1,252009 | 0,618549 | 0,618647 | 0,995938 | 0,959908 | 0,995634 | 0,958898 | 79% |
| 30% | 1,230452 | 1,196641 | 1,230324 | 0,904515 | 0,888612 | 1,019299 | 1,116303 | 1,295372 | 0,565493 | 1,704065 | 0,706944 | 0,956628 | 0,878417 | 0,878733 | 1,08722 | 1,125589 | 1,125589 | 1,502411 | 0,742259 | 0,742376 | 1,195126 | 1,151889 | 1,194761 | 1,151877 | 38% |
| 35% | 1,435528 | 1,396081 | 1,435378 | 1,055268 | 1,036714 | 1,189182 | 1,302354 | 1,511267 | 0,659742 | 1,988076 | 0,824768 | 1,116067 | 1,02482 | 1,025189 | 1,268424 | 1,313187 | 1,313187 | 1,752813 | 0,865969 | 0,866106 | 1,394314 | 1,343871 | 1,393888 | 1,343857 | 17% |
| 40% | 1,640603 | 1,595521 | 1,640432 | 1,206021 | 1,184815 | 1,359066 | 1,488404 | 1,727163 | 0,753991 | 2,272087 | 0,942592 | 1,275505 | 1,171223 | 1,171644 | 1,449627 | 1,500786 | 1,500786 | 2,003215 | 0,989678 | 0,989833 | 1,593502 | 1,535853 | 1,593015 | 1,535836 | 17% |
| 45% | 1,845679 | 1,794961 | 1,845486 | 1,356773 | 1,332917 | 1,528949 | 1,674455 | 1,943058 | 0,84824 | 2,556098 | 1,060416 | 1,434943 | 1,317626 | 1,3181 | 1,630831 | 1,688384 | 1,688384 | 2,253616 | 1,113388 | 1,113564 | 1,792689 | 1,727834 | 1,792142 | 1,727816 | 4% |
| 50% | 2,050754 | 1,994401 | 2,05054 | 1,507526 | 1,481019 | 1,698832 | 1,860506 | 2,158953 | 0,942489 | 2,840109 | 1,17824 | 1,594381 | 1,464029 | 1,464556 | 1,812034 | 1,875982 | 1,875982 | 2,504018 | 1,237098 | 1,237294 | 1,991877 | 1,919816 | 1,991268 | 1,919795 | 4% |
| 55% | 2,255829 | 2,193841 | 2,255593 | 1,658278 | 1,629121 | 1,868715 | 2,046556 | 2,374849 | 1,036738 | 3,124119 | 1,296064 | 1,753819 | 1,610432 | 1,611011 | 1,993237 | 2,06358 | 2,06358 | 2,75442 | 1,360808 | 1,361023 | 2,191065 | 2,111797 | 2,190395 | 2,111775 | 0% |
| 60% | 2,460905 | 2,393281 | 2,460647 | 1,809031 | 1,777223 | 2,038599 | 2,232607 | 2,590744 | 1,130986 | 3,40813 | 1,413888 | 1,913257 | 1,756835 | 1,757467 | 2,174441 | 2,251178 | 2,251178 | 3,004822 | 1,484517 | 1,484753 | 2,390252 | 2,303754 | 2,389522 | 2,303754 | 0% |
| 65% | 2,66598 | 2,592721 | 2,665701 | 1,959783 | 1,925325 | 2,208482 | 2,418657 | 2,806639 | 1,225235 | 3,692141 | 1,531712 | 2,072695 | 1,903237 | 1,903922 | 2,355644 | 2,438777 | 2,438777 | 3,255224 | 1,608227 | 1,608422 | 2,58944 | 2,49576 | 2,588649 | 2,495734 | 0% |
| 70% | 2,871056 | 2,792161 | 2,870755 | 2,110536 | 2,072427 | 2,378365 | 2,604708 | 3,022535 | 1,319484 | 3,976152 | 1,648536 | 2,232133 | 2,04964 | 2,050378 | 2,536848 | 2,626375 | 2,626375 | 3,505625 | 1,731937 | 1,732211 | 2,788628 | 2,687742 | 2,787776 | 2,687713 | 0% |
| 75% | 3,076131 | 2,991602 | 3,075809 | 2,261288 | 2,221529 | 2,548248 | 2,790758 | 3,23843 | 1,413733 | 4,260163 | 1,76736 | 2,391571 | 2,196043 | 2,196833 | 2,718051 | 2,813973 | 2,813973 | 3,756027 | 1,855647 | 1,855941 | 2,987815 | 2,879724 | 2,986903 | 2,879693 | 0% |
| 80% | 3,281206 | 3,191042 | 3,280863 | 2,412041 | 2,369631 | 2,718131 | 2,976809 | 3,454325 | 1,507982 | 4,544174 | 1,885184 | 2,551009 | 2,342446 | 2,343289 | 2,899254 | 3,001571 | 3,001571 | 4,006429 | 1,979357 | 1,97967 | 3,187003 | 3,071705 | 3,186029 | 3,071673 | 0% |
| 85% | 3,486282 | 3,390482 | 3,485917 | 2,562794 | 2,517733 | 2,888015 | 3,162859 | 3,670221 | 1,602231 | 4,828185 | 2,003008 | 2,710447 | 2,488849 | 2,489744 | 3,080458 | 3,189169 | 3,189169 | 4,256831 | 2,103066 | 2,1034 | 3,386191 | 3,263687 | 3,385156 | 3,263652 | 0% |
| 90% | 3,691357 | 3,589922 | 3,690971 | 2,713546 | 2,665835 | 3,057898 | 3,34891 | 3,886116 | 1,69648 | 5,112196 | 2,120832 | 2,869885 | 2,635252 | 2,6362 | 3,261661 | 3,376768 | 3,376768 | 4,507233 | 2,226776 | 2,227129 | 3,585379 | 3,455668 | 3,584283 | 3,455632 | 0% |
| 95% | 3,896433 | 3,789362 | 3,896025 | 2,864299 | 2,813937 | 3,227781 | 3,53496 | 4,102011 | 1,790729 | 5,396206 | 2,238656 | 3,029324 | 2,781655 | 2,782656 | 3,442865 | 3,564366 | 3,564366 | 4,757634 | 2,350486 | 2,350858 | 3,784566 | 3,64765 | 3,78341 | 3,647611 | 0% |
| 100% | 4,101508 | 3,988802 | 4,101079 | 3,015051 | 2,962039 | 3,397664 | 3,721011 | 4,317907 | 1,884977 | 5,680217 | 2,35648 | 3,188762 | 2,928058 | 2,929111 | 3,624068 | 3,751964 | 3,751964 | 5,008036 | 2,474196 | 2,474588 | 3,983754 | 3,839631 | 3,982537 | 3,839591 | 0% |
| 10% | 0,815655 | 0,79324 | 0,81557 | 0,600272 | 0,589716 | 0,67571 | 0,734847 | 0,856899 | 0,374458 | 1,124722 | 0,466141 | 0,632538 | 0,582209 | 0,582418 | 0,716394 | 0,741369 | 0,741369 | 0,98553 | 0,486337 | 0,486413 | 0,78957 | 0,761005 | 0,789331 | 0,760997 | 96% |
| 15% | 1,223482 | 1,189861 | 1,223355 | 0,900408 | 0,884575 | 1,013565 | 1,10227 | 1,285348 | 0,561686 | 1,687084 | 0,702211 | 0,948807 | 0,873314 | 0,873626 | 1,074592 | 1,112053 | 1,112053 | 1,478295 | 0,729505 | 0,729619 | 1,184355 | 1,141507 | 1,183996 | 1,141495 | 38% |
| 20% | 1,631309 | 1,586481 | 1,631139 | 1,200544 | 1,179433 | 1,351421 | 1,469694 | 1,713798 | 0,748915 | 2,249445 | 0,936282 | 1,265076 | 1,164419 | 1,164835 | 1,432789 | 1,482738 | 1,482738 | 1,97106 | 0,972674 | 0,972825 | 1,579139 | 1,52201 | 1,578661 | 1,521994 | 17% |
| 25% | 2,039136 | 1,983101 | 2,038924 | 1,50068 | 1,474291 | 1,689276 | 1,837117 | 2,142247 | 0,936144 | 2,811806 | 1,170352 | 1,581345 | 1,455523 | 1,456044 | 1,790986 | 1,853422 | 1,853422 | 2,463825 | 1,215842 | 1,216031 | 1,973924 | 1,902512 | 1,973327 | 1,902492 | 4% |
| 30% | 2,446964 | 2,379721 | 2,446709 | 1,800816 | 1,769149 | 2,027131 | 2,204541 | 2,570696 | 1,123373 | 3,374167 | 1,404422 | 1,897614 | 1,746628 | 1,747253 | 2,149183 | 2,224107 | 2,224107 | 2,95659 | 1,459011 | 1,459238 | 2,368709 | 2,283014 | 2,367992 | 2,28299 | 0% |
| 35% | 2,854791 | 2,776341 | 2,854494 | 2,100953 | 2,064007 | 2,364986 | 2,571964 | 2,999146 | 1,310601 | 3,936529 | 1,638493 | 2,213883 | 2,037733 | 2,038462 | 2,507381 | 2,594791 | 2,594791 | 3,449355 | 1,702179 | 1,702444 | 2,763494 | 2,663517 | 2,762657 | 2,663489 | 0% |
| 40% | 3,262618 | 3,172961 | 3,262279 | 2,401089 | 2,358866 | 2,702841 | 2,939387 | 3,427595 | 1,49783 | 4,49889 | 1,872563 | 2,530151 | 2,328837 | 2,32967 | 2,865578 | 2,965476 | 2,965476 | 3,94212 | 1,945348 | 1,94565 | 3,158279 | 3,044019 | 3,157323 | 3,043987 | 0% |
| 45% | 3,670445 | 3,569582 | 3,670064 | 2,701225 | 2,653724 | 3,040696 | 3,306811 | 3,856044 | 1,685059 | 5,061251 | 2,106634 | 2,619942 | 2,84642 | 2,620879 | 3,223775 | 3,33616 | 3,33616 | 4,434885 | 2,188516 | 2,188857 | 3,553064 | 3,424522 | 3,551988 | 3,424486 | 0% |
| 50% | 4,078273 | 3,966202 | 4,077849 | 3,001361 | 2,948582 | 3,378551 | 3,674234 | 4,284494 | 1,872288 | 5,623612 | 2,340704 | 3,162689 | 2,911047 | 2,912088 | 3,581972 | 3,706845 | 3,706845 | 4,92765 | 2,431684 | 2,432063 | 3,947848 | 3,805024 | 3,946653 | 3,804984 | 0% |
| 55% | 4,4861 | 4,362822 | 4,485633 | 3,301497 | 3,24344 | 3,716407 | 4,041658 | 4,712943 | 2,059516 | 6,185973 | 2,574774 | 3,478958 | 3,202151 | 3,203297 | 3,940169 | 4,077529 | 4,077529 | 5,420415 | 2,674853 | 2,675269 | 4,342633 | 4,185526 | 4,341318 | 4,185482 | 0% |
| 60% | 4,893927 | 4,759442 | 4,893418 | 3,601633 | 3,538298 | 4,054262 | 4,409081 | 5,141393 | 2,246745 | 6,748335 | 2,808845 | 3,795227 | 3,493256 | 3,494505 | 4,298367 | 4,448214 | 4,448214 | 5,91318 | 2,918021 | 2,918475 | 4,737418 | 4,566029 | 4,735984 | 4,565981 | 0% |
| 65% | 5,301754 | 5,156062 | 5,301203 | 3,901769 | 3,833157 | 4,392117 | 4,776505 | 5,569842 | 2,433974 | 7,310696 | 3,042915 | 4,111496 | 3,784361 | 3,785714 | 4,656564 | 4,818898 | 4,818898 | 6,405945 | 3,16119 | 3,161682 | 5,132203 | 4,946531 | 5,130649 | 4,946479 | 0% |
| 70% | 5,709582 | 5,552683 | 5,708988 | 4,201905 | 4,128015 | 4,729972 | 5,143928 | 5,998291 | 2,621203 | 7,873057 | 3,276986 | 4,427765 | 4,075465 | 4,076923 | 5,014761 | 5,189583 | 5,189583 | 6,89871 | 3,404358 | 3,404888 | 5,526988 | 5,327034 | 5,525314 | 5,326978 | 0% |
| 75% | 6,117409 | 5,949303 | 6,116773 | 4,502041 | 4,422873 | 5,067827 | 5,511351 | 6,426741 | 2,808431 | 8,435418 | 3,511056 | 4,744034 | 4,36657 | 4,368132 | 5,372958 | 5,560267 | 5,560267 | 7,391475 | 3,647527 | 3,648094 | 5,921773 | 5,707536 | 5,91998 | 5,707476 | 0% |
| 80% | 6,525236 | 6,345923 | 6,524558 | 4,802177 | 4,717731 | 5,405682 | 5,878775 | 6,85519 | 2,99566 | 8,99778 | 3,745127 | 5,060303 | 4,657675 | 4,659341 | 5,731156 | 5,930952 | 5,930952 | 7,88424 | 3,890695 | 3,891301 | 6,316557 | 6,088038 | 6,314645 | 6,087974 | 0% |
| 85% | 6,933064 | 6,742543 | 6,932343 | 5,102313 | 5,012589 | 5,743537 | 6,246198 | 7,283639 | 3,182889 | 9,560141 | 3,979197 | 5,376572 | 4,948779 | 4,950549 | 6,089353 | 6,301636 | 6,301636 | 8,377005 | 4,133863 | 4,134507 | 6,711342 | 6,468541 | 6,70931 | 6,468473 | 0% |
| 90% | 7,340891 | 7,139163 | 7,340127 | 5,402449 | 5,307448 | 6,081393 | 6,613622 | 7,712089 | 3,370118 | 10,1225 | 4,213267 | 5,692841 | 5,239884 | 5,241758 | 6,447755 | 6,672321 | 6,672321 | 8,869771 | 4,377032 | 4,377713 | 7,106127 | 6,849043 | 7,103976 | 6,848971 | 0% |
| 95% | 7,748718 | 7,535783 | 7,747912 | 5,702585 | 5,602306 | 6,419248 | 6,981045 | 8,140538 | 3,557347 | 10,68486 | 4,447238 | 6,00911 | 5,530989 | 5,532967 | 6,805747 | 7,043005 | 7,043005 | 9,362536 | 4,6202 | 4,620919 | 7,500912 | 7,229546 | 7,498641 | 7,22947 | 0% |
| 100% | 8,156545 | 7,932404 | 8,155697 | 6,002721 | 5,897164 | 6,757103 | 7,348469 | 8,569888 | 3,744575 | 11,24722 | 4,681408 | 6,325379 | 5,822093 | 5,824176 | 7,163944 | 7,413689 | 7,413689 | 9,855301 | 4,863369 | 4,864126 | 7,895697 | 7,610048 | 7,893306 | 7,609968 | 0% |

Figura 4.14: Tabella per il calcolo di $R_0$

In figura 4.14 sono presenti molti dati che vengono ora identificati:

- Le prime righe seguono quelle di figura 4.12 con l'unica aggiunta dei posti totali di ogni ambiente che come prevedibile entrano nel calcolo del numero di riproduzione di base
- Al di sotto della prima sotto-tabellina che abbiamo già riconosciuto ve ne sono una seconda ed una terza: queste presentano nella loro colonna più a sinistra una percentuale di occupazione dell'ambiente che spazia dal 10% al 100% e nel loro corpo i valori calcolati tramite la moltiplicazione del rischio e del numero di persone. La prima delle due indica la situazione più comune di infetto singolo e utilizzo DPI, mentre la seconda il caso di infetto singolo, ma senza i dispositivi di protezione individuale
- Le caselle formattate di verde sono quelle per cui è rispettata la condizione di $R_0 \leq 1$. Questa potrebbe indicare efficacemente che l'impianto di ventilazione, tramite la sua azione di rimozione di cariche virali di natura airborne, impedisce il contagio anche di un'altra sola persona in ambiente e dunque essere presa in considerazione limite
- Infine la colonna più a destra riporta un'altra percentuale: questa indica invece il numero di ambienti sul totale che rispettano la condizione indicata. Vengono formattate di verde tutte quelle percentuali al di sopra del 75% che prevedono dunque la grande maggioranza di casi positivi

In questo punto elenco vengono riportate due condizioni che vale la pena di ripetere: $R_0 \leq 1$ e $\%amb_{ok} \geq 75\%$. Laddove queste fossero condivise da chi legge si può efficacemente notare come la riduzione del al 25% dei posti totali rientra nelle previsioni di limitazione del contagio *unicamente* a seguito dell'utilizzo continuativo e corretto dei dispositivi di protezione individuale. Si è voluto riportare solo queste due situazioni in quanto la condizione non era mai rispettata invece nel caso del 10% di infetti (che in realtà è già molto rara). Infatti, qualora non fosse rispettata la precauzione respiratoria indicata l'unica percentuale di occupazione che garantirebbe un livello minimo di contagio è quella del 10%, del tutto improponibile per un'ateneo come il Politecnico di Torino, che area enormi ambienti come le aule della sede centrale. Il valore di $\%amb_{ok}$ precipita fino al 38% anche solo con un'occupazione del 15% e solamente il 4% di aule risulterebbero passabili con la precauzione prevista dagli enti regolanti dell'università. Come si può notare invece le stanze `9s` e `11s` che erano state segnalate in rosso per il modello del rischio di contagio hanno degli $R_0$ relativamente ridotti, per via del fatto che sono molto piccole e dunque scarsamente occupate. Il peso delle dimensioni degli ambienti che conta così tanto nel modello che ci presenta la percentuale di rischio viene ponderato ed attenuato dal parametro degli occupanti che ne riduce l'effetto e migliora la qualità del risultato finale.

Si vuole concludere questo capitolo indicando quindi come la situazione delle aule asservite dagli impianti di ventilazione meccanica per mezzo di UTA della sede centrale è buona nella maggior parte dei casi. Vanno rivisti con attenzione tutti quegli ambienti che rientrano nel blocco sotterraneo e in minima parte anche le aule dell'ex centrale termica. Infine, nei grandi ambienti come le aule da 1 a 6 la volumetria favorisce la diluizione delle cariche e la riduzione percentuale di occupanti è un'ottima precauzione visto anche il buon distanziamento sociale che questa comporterebbe. **Le aule del Politecnico sono dunque per la maggior parte sicure solamente se è previsto e applicato dovunque l'utilizzo obbligatorio di mascherine e sono rispettati e mantenuti in ogni ambiente distanziamento sociale, comportamenti igienici e respiratori corretti e una riduzione dell'occupazione al 25% e non oltre**.

# Capitolo 5

# Simulazioni applicative: teoria preliminare

## 5.1 Introduzione

In questa ultima parte della tesi si vuole presentare uno studio dell'andamento del rischio di contagio all'interno di un ambiente per mezzo di un software di simulazione fluidodinamica. Questo può essere effettuato avvalendosi delle conoscenze finora ottenute sulle dinamiche della trasmissione della patologia, nonché sulle numerose informazioni contenute in letteratura. È infatti di assoluta importanza l'impostazione della simulazione con dati quanto più possibile accurati e vicini alla realtà. Alla luce del fatto che le simulazioni in fin dei conti consistono nella risoluzione discreta di equazioni differenziali anche piuttosto complesse, possiamo dire che questa ultima parte più che presentare risposte serve a porsi le giuste domande riguardo il ruolo della ventilazione nello spargimento in ambiente di droplets e cariche virali. I modelli e i motori fisici che in prima linea prendono parte alla determinazione dei risultati, sono infatti anch'essi non privi di forti difetti: un esempio importante sono le equazioni `RANS` di cui si parlerà nelle prossime sezioni in maniera più approfondita.

### 5.1.1 Software utilizzato

Il software utilizzato per questo lavoro è stato `Simcenter STAR-CCM+` ®, presso una delle workstation del dipartimento di energetica del Politecnico (`DENERG`). Il programma è definito `CAE` (*Computer Aided Engineering*) ed è in grado di risolvere problemi multidisciplinari nei campi della fluidodinamica e della meccanica del continuo (corpi solidi). La sua schermata unica integrata, facilita estremamente la costruzione e il *run*

di progetti complessi e compositi. È messo a disposizione dell'utente un ampio set di componenti, parametri, personalizzazione e risolutori (dall'inglese `solvers`), che garantiscono una rappresentazione fedele della realtà. Alla luce di ciò è possibile sfruttare questo potente mezzo per rappresentare e prevedere con precisione i moti delle particelle in un ambiente, nonché l'effetto di alcune tipologie di terminali, in questo studio fortemente semplificati, sulla distribuzione delle velocità dell'aria in una stanza. L'accuratezza della soluzione ottenuta per mezzo delle equazioni matematiche integrate nel software, fa di questo programma un eccezionale aiuto nella comprensione della diffusione della pandemia. Sono stati inoltre aggiunti alle letture effettuate già per le precedenti parti, altri nuovi e recentissimi articoli scientifici che riguardano specificatamente l'ambito della simulazione. Questi verranno in seguito descritti e spiegati, nonché ampiamente utilizzati come spunto per i calcoli e le analisi dei risultati.

### 5.1.2 Ripasso della teoria: Fluid Flow

Quello che in fin dei conti viene svolto da un software come quello appena descritto è la risoluzione di complesse equazioni matematiche che derivano dallo studio teorico della fisica dei problemi fluidodinamici. Queste, essendo spesso alle derivate parziali, sia spaziali che temporali, vengono in ultimo discretizzate secondo algoritmi interni al programma e risolte in maniera meccanica nel dominio in analisi. Le quattro classiche equazioni di conservazione che regolano genericamente le meccanica dei fluidi e dei solidi sono:

- Conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \overline{v}) = 0 \tag{5.1}$$

- Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial (\rho \overline{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \overline{v} \otimes \overline{v}) = -\nabla p - \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}} + \rho \overline{g} \tag{5.2}$$

- Conservazione del momento angolare:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\sigma}}^T \tag{5.3}$$

- Conservazione dell'energia (in una delle sue numerosissime formulazioni):

$$\frac{D(\rho e)}{Dt} = -\nabla \cdot \overline{q} - \nabla \cdot (p \overline{v}) - \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}} \overline{v}) + \rho \overline{g}\, \overline{v} \tag{5.4}$$

Queste possono essere studiate e derivate secondo due approcci differenti: l'approccio Euleriano che fissa un dato *volume* nello spazio e vede le equazioni come il

risultato dello scorrere delle varie grandezze attraverso quest'ultimo o l'approccio Lagrangiano, il quale segue invece un determinato *volume* che si muove nello spazio. È importante decidere quale dei due sia migliore nel caso in analisi in quanto una corretta scelta può semplificare e velocizzare la soluzione (come poi si vedrà nelle sezioni successive). All'atto dell'implementazione pratica di queste equazioni al dominio studiato compare la loro forma integrale. Questa è alquanto informativa poiché, tramite il Teorema di Gauss (o della divergenza) separa nettamente le componenti volumiche da quelle superficiali. Lo studio delle singole equazioni, della loro derivazione e delle loro conseguenze esula dallo scopo di questo testo, che le presenta unicamente come ripasso generale.
Un altro punto molto importante nell'accuratezza della rappresentazione di un possibile moto di un fluido in un dominio è dato dalla presenza non trascurabile di turbolenza: tale fenomeno porta a dei problemi lungi dall'essere risolti, sia a livello ingegneristico sperimentale (ottenimento di moti casuali e imprevedibili), sia a livello matematico teorico (risoluzione di complesse equazioni differenziali). Uno degli approcci più seguiti, in quanto tendenzialmente semplice ed efficace, è quello delle equazioni `RANS`, acronimo per *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*. Queste sono ottenute tramite un'operazione di media sulle formule presenti nella pagina precedente. Tale accorgimento matematico serve a distinguere le componenti oscillatorie, tendenzialmente legate al fenomeno della turbolenza, da quelle stazionarie che sono invece dettate dalle condizioni al contorno e dall'impostazione generale del problema. La risoluzione di queste nuove equazioni comporta ulteriori complicazioni e algoritmi tra cui il modello più famoso è l'*Eddy-Viscosity Model*, basato sostanzialmente sull'analogia tra i processi di diffusione secondo i gradienti di concentrazione, tipici degli studi a livello molecolare e la generazione di moti turbolenti. Ad esso sono legate ulteriori equazioni di conservazione e trasporto che devono essere a loro volta risolte in maniera discretizzata.

Per capire meglio cosa comporta questa discretizzazione e la complessità di calcolo che può venir fuori anche dai più semplici progetti si prenda ad esempio una generica equazione di trasporto nella sua forma integrale (come possono essere derivate da quelle presenti nel primo punto elenco della sottosezione):

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho\phi dV + \int_A \rho\bar{v}\phi da = \int_A \Lambda\nabla\phi da + \int_V S_\phi dV \tag{5.5}$$

I quattro termini possono essere descritti in ordine:

1. *Transient Term*: questo indica il tasso di variazione della grandezza $\phi$ nel *volume* di controllo

2. *Convective flux*: ovvero il tasso di variazione di $\phi$ per convezione attraverso le *superfici* del volume di controllo

3. *Diffusive flux*: il tasso di variazione di $\phi$ per effetto della diffusione attraverso le *superfici* di controllo

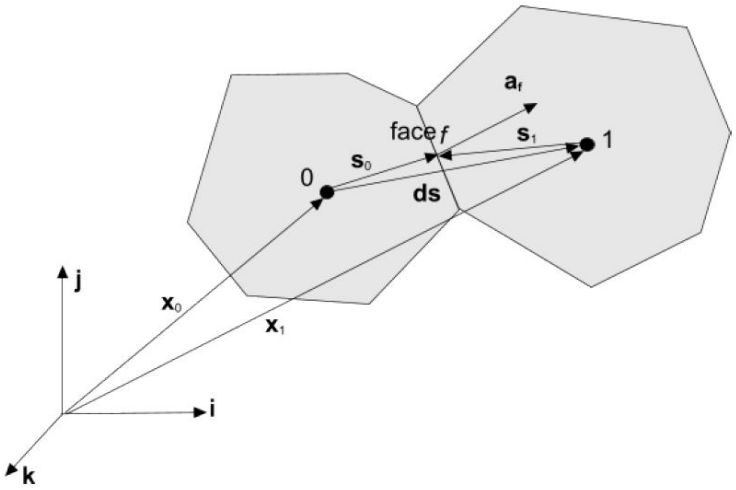



Figura 5.1: Rappresentazione di due celle per la risoluzione numerica delle equazioni di trasporto. Da [62]

4. *Source Term*: generazione interna di $\phi$ nel *volume* di controllo

I termini di flusso (ovvero quelli legati agli integrali di superficie) possono essere sostituiti da sommatorie che iterativamente includono le facce di tutte le cellette della griglia di calcolo (indice $f$).

$$\int_A \mathbf{J}^\phi da \approx \sum_f \mathbf{J}_f^\phi \cdot a_f$$

dove con $\mathbf{J}_f^\phi$ si indica proprio il flusso della grandezza $\phi$ attraverso la faccia $f$ per effetto della convezione ($\mathbf{C}_f^\phi$) o della diffusione ($\mathbf{D}_f^\phi$). Per determinare infine i valori di $\phi_f$ su ogni faccia, ancora incogniti, vengono implementati alcuni algoritmi di interpolazione che sono fondamentali nel raggiungimento della convergenza, ovvero nella stabilità e accuratezza dello schema numerico. Per quanto riguarda la convezione, il più famoso fra i numerosi modelli di `STAR-CCM+` è il `FOU` (*First-Order Upwind*). Questo non è altro che un'approssimazione di primo ordine "a gradini". La sua formulazione matematica segue:

$$\mathbf{C}_f^\phi = (\dot{m}\phi)_f = \begin{cases} \dot{m}_f \phi_0 & \dot{m}_f \geq 0 \\ \dot{m}_f \phi_1 & \dot{m}_f < 0 \end{cases}$$

Il valore della grandezza sulla faccia segue solamente la direzione del flusso della stessa attraverso essa, ed è approssimato con il valore immediatamente a monte. È possibile raffinare l'algoritmo per mezzo di interpolazioni più complesse (ad esempio di secondo ordine). Per il termine diffusivo, poiché questo è legato al gradiente della

grandezza in analisi, e non al semplice valore della stessa, l'approssimazione è più complessa. Infatti:

$$\nabla\phi_f = (\phi_1 - \phi_0)\underline{\alpha} + \overline{\nabla\phi} - (\overline{\nabla\phi}\mathbf{ds})\underline{\alpha}$$

dove:

$$\underline{\alpha} = \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{a}\cdot\mathbf{ds}}$$
$$\mathbf{ds} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0$$
$$\overline{\nabla\phi} = \frac{\nabla\phi_0 + \nabla\phi_1}{2}$$

Il valore approssimato del gradiente è dunque funzione di: un parametro $\underline{\alpha}$ che indica la posizione e orientazione relativa della faccia rispetto alla congiungente dei due centri delle celle che la condividono, della distanza dei due centri stessi e della media dei gradienti ivi ottenuti. Si faccia riferimento alla figura 5.1. È dunque possibile sostituire tale espressione nella seguente formulazione per ottenere la grandezza ricercata:

$$\mathbf{D}_f^{\phi} = \Lambda_f \nabla\phi_f \cdot \mathbf{a}$$

dove $\Lambda_f$ è una media armonica del coefficiente di diffusione della grandezza per tutte le celle. Il più semplice dei quattro termini in (5.5) è l'ultimo, ovvero la generazione interna di grandezza. Questo infatti è approssimato per mezzo del valore medio di generazione nella cella, che tendenzialmente è piccolo a sufficienza da non commettere significativi errori nell'assumerlo omogeneo e costante. Quindi segue:

$$\int_V S_\phi dV \approx (S_\phi V)_0$$

Per ultimo il primo dei termini dell'equazione (5.5), ovvero quello che rappresenta il transitorio. In una simulazione è alquanto probabile che il tempo sia un fattore che giochi un ruolo centrale e deve essere considerato a tutti gli effetti una *quarta coordinata*. Questa deve essere discretizzata non meno che le altre tre. Si creano dunque dei *time-step*. Ognuno influenza in maniera sostanziale il successivo secondo regole più o meno simili a come una grandezza in una cella influenza quella a sé vicina. Anche in questo caso esistono numerosissimi algoritmi e modelli di integrazione temporale che vengono suddivisi a seconda di quanti *time-steps* prendono in considerazione e di come li introducono nel metodo numerico. Il più semplice risulta essere la *Implicit Time Integration* secondo lo schema di Eulero di prim'ordine. Ipotizzando di star computando il *time-step* $n+1$ si scrive:

$$\frac{d}{dt}(\rho\phi V)_0 = \frac{(\rho\phi V)_0^{n+1} - (\rho\phi V)_0^n}{\Delta t}$$

Come si può leggere questo modello prende in considerazione solo il time step precedente. L'ordine cresce linearmente con il numero di passi temporali inclusi,

ad esempio:

$$\frac{d}{dt}(\rho\phi V) = \left[\frac{3}{2}(\rho\phi V)_{n+1} - 2(\rho\phi V)_n + \frac{1}{2}(\rho\phi V)_{n-1}\right]\frac{1}{\Delta t}$$

I coefficienti davanti a ogni time step sono variabili anch'essi secondo l'ordine del metodo. Il primo time-step di ogni simulazione è ovviamente implementato secondo le modalità previste da un'equazione di primo ordine, poiché solo due time-step sono presenti. Per concludere, l'equazione presentata in 5.5 può essere discretizzata secondo:

$$\frac{d}{dt}(\rho\phi V)_0 + \sum_f \mathbf{C}_f^\phi = \sum_f \mathbf{D}_f^\phi + (S_\phi V)_0 \tag{5.6}$$

Per ognuno di questi passaggi per ognuna delle equazioni di trasporto presentate è possibile calcolare un errore sulla discretizzazione. Il suo valore è riportato dal software per ogni *time-step* sotto il nome di *residuals*. Il ridursi di tali residui a valori minimi e la tendenza di questi a stabilizzarsi e non oscillare è un segno del raggiungimento della convergenza della soluzione.

### 5.1.3 Ripasso della teoria: Lagrangian Multiphase Flow

Alla luce del fatto che questo lavoro segue la problematica della dispersione di droplets in un ambiente è indispensabile trovare un modello fisico che abbia a che fare con una duplicità di fasi nello stesso dominio. Il software mettere a disposizione dei *solver* che si occupano di risolvere tutte quelle equazioni che riguardano proprio questo fenomeno. Nello specifico è possibile, come anche in precedenza, porsi davanti allo studio del comportamento di una fase immersa in una matrice secondo due modalità distinte e già conosciute: l'approccio Euleriano e quello Lagrangiano. La definizione di fase è associata solitamente a gas, liquidi e particelle solide come ad esempio bolle d'aria in un bicchiere d'acqua, granelli di sabbia sospesi in aria per mezzo del vento o gocce di pioggia che cadono dal cielo. In realtà questa può essere generalizzata ad altre caratteristiche del fluido come dimensione, temperatura, densità e forma. I problemi che possono nascere dall'implementazione di più fasi sono molteplici, per via delle innumerevoli possibilità di interazione con la matrice. In questa sottosezione si presenterà dunque solo la teoria relativa al capitolo delle droplets sospese in aria, secondo approccio Lagrangiano. È infatti inapplicabile il modello Euleriano, che prevede la risoluzione delle equazioni di trasporto per ciascuna fase considerate come *inter-penetrating continua*: poiché le particelle in analisi sono di dimensioni micrometriche questo prevederebbe la creazione di una griglia di celle (come quelle raffigurate in figura 5.1) di dimensioni tali da riuscire a includerle. Ciò avrebbe come conseguenza un costo computazionale impensabile. D'altro canto l'approccio Lagrangiano risolve le equazioni per ogni particella, determinando localmente i valori delle grandezze ricercate. Questo permette uno studio più approssimativo della matrice, senza perdere qualità della soluzione ed è

sicuramente adatto a tutti quei casi in cui vi sono numerosi ordini di grandezza di differenza tra matrice e fasi. Il software mette anche a disposizione la possibilità di implementare entrambi i modelli, qualora ciò sia necessario. Le interazioni tra fase e matrice che l'approccio Lagrangiano permette di analizzare sono tendenzialmente degli scambi di quantità di moto, di energia e di massa. Le condizioni al contorno possono prevedere diversi comportamenti per tutte quelle superfici che non sono permeabili alla fase, come ad esempio il rimbalzo o l'attaccamento. Le particelle possono anche interagire tra loro, nel caso in cui la concentrazione sia sufficientemente alta. Poiché le equazioni di trasporto vengono risolte localmente è possibile tracciare il percorso di ogni singola particella e, qualora queste siano in numero è sufficiente, implementare anche un approccio statistico per evitare di appesantire il calcolo. Infine la fase sospesa può assumere molte forme, dalla più classica sferica a quella cilindrica o casuale. Vi è anche la possibilità di definire fasi con comportamenti più disparati: evaporazione, combustione, reazioni chimiche generiche, ecc ... che conseguono in scambi di massa.
Il primo punto da evidenziare è come variano le equazioni descritte nella sottosezione precedente in uno schema di lavoro Lagrangiano Multifase. Per ogni particella è possibile scrivere:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_b \tag{5.7}$$

dove i termini a destra dell'uguale sono le risultanti delle forze di superficie e di volume. Ricordiamo che questi argomenti sono già stati trattati in maniera approssimata in 1.3.1. Tra le forze ivi elencate si vuole approfondire la *drag force* responsabile in prima battuta del trasporto e sospensione delle droplets in aria. Questa ha forma:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_p |\mathbf{v}_s| \mathbf{v}_s \tag{5.8}$$

e dipende sostanzialmente da un coefficiente numerico $C_d$, dalla densità della matrice $\rho$, dall'area esposta $A_p$ e dalla *slip velocity* $\mathbf{v}_s = \mathbf{v} - \mathbf{v}_p$, definita come differenza tra velocità locale della matrice e quella della singola particella sospesa. Il valore di $C_d$ è collegato alle caratteristiche del moto a livello microscopico della matrice nelle vicinanze della particella. Tendenzialmente questo viene determinato sperimentalmente prima di procedere alla simulazione, ma può anche essere dedotto da studi teorici e il software mette a disposizione alcune formulazioni più conosciute. Quella usata più comunemente è la *Schiller-Naumann Correlation*:

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p}(1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & Re_p \leq 10^3 \\ 0.44 & Re_p > 10^3 \end{cases}$$

dove $Re_p$ è il numero di Reynolds locale della particella definito come:

$$Re_p = \frac{\rho |\mathbf{v}_s| D_p}{\mu}$$

I parametri di densità e viscosità dinamica sono propri della matrice. Il punto su cui fare attenzione è però la *slip velocity*. Dal fatto che le droplets che verranno analizzate in questo lavoro sono molto piccole è plausibile che la loro velocità sia prossima, se non del tutto uguale, a quella dei flussi d'aria che le investono. Ciò ha come conseguenza che il valore di $\mathbf{v}_s$ sarà sempre molto piccolo, generando dunque una situazione locale nei pressi delle particelle tendenzialmente laminare. Ognuna delle forze elencate in 1.3.1 è risultato di una formula simile nella teoria a (5.8) e prende parte in (5.7) per la determinazione del comportamento della fase sospesa. Un ultimo accenno riguarda l'iniezione di fase nella matrice. Questa verrà discussa nelle sezioni che seguono, ma a livello teorico può assumere diverse condizioni. Il primo parametro da considerare è la dimensione delle particelle, la quale può essere indicata per mezzo del diametro o della massa. Il software genera automaticamente una funzione cumulativa di distribuzione dei diametri $F(D)$ al cui interno sono contenute le informazioni riguardo questo valore. Le sue caratteristiche sono proprie di una funzione in tale maniera definita:

$$\lim_{D\to 0} F(D) = 0$$

$$\lim_{D\to \infty} F(D) = 1$$

$$\frac{dF(D)}{dD} \geq 0$$

Un esempio di funzione di questo genere è rappresentata in figura 4.10 dove la grandezza ad essere accumulata era il rischio di contagio in un'aula. Dato che però questa non è normalizzata, il limite che tende ad infinito non è unitario. Il programma prende dunque $F(D)$ e ne estrae i valori dei diametri delle particelle immesse (o il diametro statistico per la teoria dei Parcel). Si elencano ora alcuni esempi:

- **Log-Normal**
  La curva log-normale segue una distribuzione Gaussiana dove il logaritmo della dimensione principale della particella è usata come variabile indipendente secondo la formulazione:

$$F(D) = \frac{1}{2}\left[1 + erf\left(\frac{ln(D) - ln(\overline{D})}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right]$$

- **Normal**
  La curva normale segue una distribuzione Gaussiana dove la dimensione principale della particella è usata come variabile indipendente secondo la formulazione:

$$F(D) = \frac{1}{2}\left[1 + erf\left(\frac{D - \overline{D}}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right]$$

- **Rosin-Rammler**
  La curva di Rosin-Rammler è stata sviluppata e implementata in STAR-CCM+ con lo scopo di descrivere una distribuzione volumica per mezzo delle dimensioni delle particelle. In questo caso si sposta l'attenzione dai diametri ai volumi secondo la formulazione:

$$F(D) = 1 - exp\left[-\left(\frac{D}{D_{ref}}\right)^{q}\right]$$

## 5.2 Descrizione preliminare del problema

Si presenta ora una prima introduzione al problema che verrà affrontato nel corso delle simulazioni. Come già detto, quanto si vuole proporre in questa ultima parte è un'analisi più approfondita in casi semplici dell'andamento del rischio di contagio in una stanza. Questo è influenzato sostanzialmente da alcuni parametri, che possono essere simulati efficacemente da un software `CAE` come `STAR-CCM+` e possono essere riassunti in:

1. Distribuzione e moto dell'aria in ambiente
2. Tasso di immissione di aria esterna
3. Distanza relativa fra gli occupanti
4. Postura e orientazione relativa degli occupanti
5. Modalità di respirazione
6. Dimensione delle particelle emesse dagli infetti e inalate dai suscettibili
7. Movimento delle persone all'interno dell'ambiente

Ognuno di questi aspetti può essere sviscerato e analizzato secondo i metodi proposti in [59, 60] ed altri studi. In linea di principio questi possono essere suddivisi ulteriormente in: **comportamento macroscopico dell'aria** (punti 1 e 2), **comportamento macroscopico degli occupanti** (punti 3, 4 e 7) e **comportamento microscopico delle *droplets*** (punti 5 e 6). Per ogni ambiente che si vuole studiare questi ne identificano in maniera sostanziale le problematiche da risolvere e la loro piena comprensione è un ottimo punto di partenza per l'impostazione di una soluzione. Si è scelto di optare per una `CFD` (*Computer Fluid-Dynamics*) per una serie di motivi:

- La possibilità di discretizzare finemente la coordinata temporale e di ottenere soluzioni ad alta risoluzione
- Il totale controllo delle condizioni al contorno, che conseguono in una buona gestione dei domini presenti

- La possibilità di creare degli studi parametrici

Al contempo non devono essere dimenticati anche i difetti di questa ricerca della soluzione (che verranno studiati più approfonditamente nelle sezioni a seguire) tra cui:

- Ogni simulazione dovrebbe sempre essere validata per mezzo di studi sperimentali
- I risultati sono spesso fortemente dipendenti dalle conoscenze pregresse dell'utente e dall'impostazione corretta di tutti i parametri
- Le equazione di risoluzione di problemi complessi come la turbolenza sono intrinsecamente inadeguate
- L'accuratezza può essere scarsa a seguito di errori numerici dei modelli (a loro volta ad esempio dovuti ad una semplificazione esagerata della geometria, ad una generazione poco mirata della griglia di mesh, al trattamento di condizioni al contorno, ecc...)

### 5.2.1 Comportamento macroscopico dell'aria

Questo punto va analizzato a fondo nella descrizione del problema in quanto è il principale responsabile della dispersione di droplets in aria. Il contagio Airborne può avvenire, a seconda delle sue modalità all'interno di un ambiente unico, ma, laddove siano rispettate certe condizioni, anche in stanze diverse, attraverso i piani di un edificio e, in condizioni critiche, anche tra più edifici differenti. In ambiento prettamente simulativo tale aspetto riguarda principalmente le condizioni al contorno che devono essere imposte al dominio, ovvero il volume d'aria all'interno della stanza in analisi. Queste infatti impongono una direzione e velocità specifiche in corrispondenza di determinate sezioni, poste presso i terminali. In [59] vengono identificate alcune diverse modalità di ventilazione degli ambienti:

- *Mixing Ventilation* con terminali in ambiente che si occupano della miscelazione di aria "vecchia" e aria "nuova"
- *Displacement Ventilation* con immissione di aria in ambiente tale da innescare forti moti convettivi
- *Under Floor Air Distribution* simile alla precedente solo con diffusori posti al di sotto del livello calpestabile
- *Downward Ventilation* simile alla ventilazione per miscelazione, ma con una specifica direzione dei moti d'aria in ambiente

- *Advanced Ventilation Technologies* che includono dispositivi di immissione ed estrazione d'aria personali e tendenzialmente utilizzati in luoghi ad altissimo rischio come negli ospedali

Ognuno può essere approfonditamente studiato e correlato al relativo rischio di contagio. A livello matematico, nello studio presentato da Vuorinen et al. [60], che verrà estesamente utilizzato a seguire, la ventilazione compare nelle equazioni di controllo del rischio. Infatti indicando con $c$ la concentrazione locale di droplets infette in un determinato volume di riferimento nello spazio si può scrivere l'equazione di dispersione delle particelle in ambiente come:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\Delta c + S - c/\tau \tag{5.9}$$

dove $D$ è una constante di diffusione delle particelle in ambiente, $S$ è un termine di generazione che si studierà in seguito e $-c/\tau$ è l'effetto di rimozione dell'aerosol per mezzo della ventilazione. Si conclude dicendo che l'analisi del moto dell'aria è uno dei risultati ingegneristici più importanti nella limitazione e il controllo della trasmissione *airborne* e che questi sono spesso di natura complessa e contro-intuitiva.

### 5.2.2 Comportamento macroscopico degli occupanti

Nella distribuzione della probabilità di contagio, ma soprattutto per quanto concerne il rischio percentuale di infezione di un suscettibile da parte di un infetto rientra sicuramente il comportamento degli occupanti all'interno della stanza. Questi possono occupare posizioni fisse, seduti o in piedi, oppure muoversi all'interno dell'ambiente in maniera prevedibile o casuale. La distanza relativa tra le persone è centrale per il contenimento della diffusione per *contagio diretto*. La postura e orientazione relativa può giocare un ruolo importante laddove, ad esempio, si vuole proporre uno studio in un ambiente in cui sia molto specifica la dislocazione degli occupanti, come una sala da cinema o una carrozza di un treno. Infatti la direzionalità forte dei getti d'aria espulsi durante le attività respiratorie potrebbe influenzare sensibilmente il rischio, specialmente sulla corta distanza. In figura 5.2 è possibile vedere alcune delle posizioni relative che possono esistere tra una persona infetta e suscettibile. Tenere conto di questa nuova problematica raffina lo studio e ne aumenta sicuramente la qualità dei risultati. In figura 5.3 viene rappresentato graficamente lo studio di Vuorinen et al. che introduce un ulteriore grado di libertà con la movimentazione degli occupanti, al variare del parametro $N$ (di cui si parlerà ampiamente in seguito) e della loro velocità. Nell'equazione 5.9 questo comportamento può essere rappresentato dal valore del termine $S$, ovvero la componente di generale interna di aerosol secondo:

$$S = \sum_k S_k(x - x_k, y - y_k, t)$$

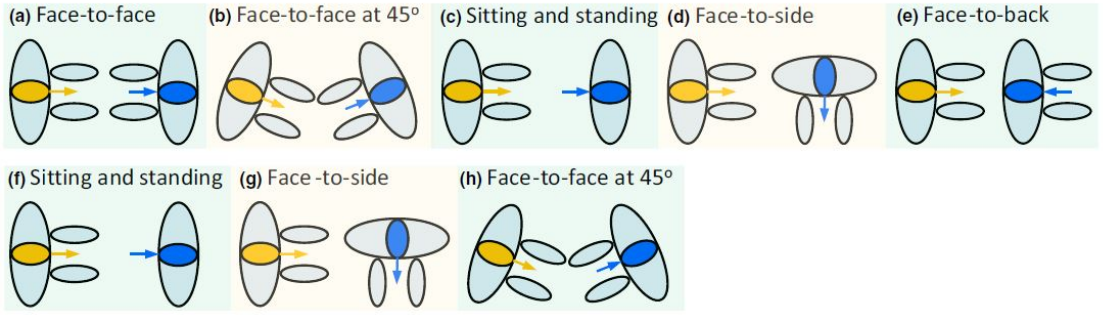



Figura 5.2: Alcune posizioni relative tra infetto e suscettibile sulla corta distanza. Da [59]

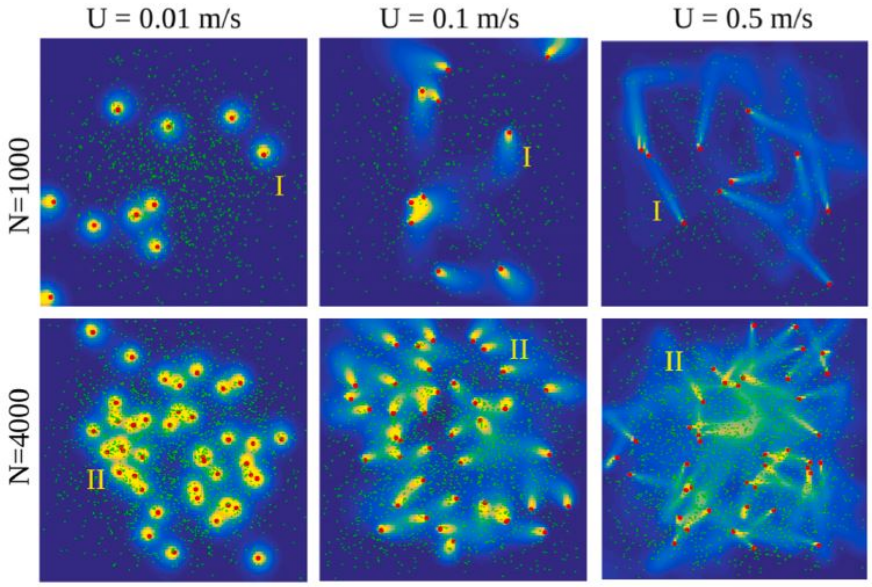



Figura 5.3: Rischio di contagio per persone in moto in un supermercato al variare di velocità e numero. Da [60]

dove le coordinate spaziali e temporali si riferiscono proprio alla posizione occupata dalle persone infette (con il relativo riferimento temporale) e il termine $S_k$ è l'evento di generazione in corrispondenza di tale punto.

### 5.2.3 Comportamento miscroscopico delle droplets

L'aspetto più importante, in relazione al lavoro di creazione di una simulazione accurata, è sicuramente il comportamento microscopico delle *droplets*. Questo concerne in prima battuta:

1. la loro dimensione

2. la loro generazione (in senso di velocità di ingresso e direzionalità)
3. l'interazione con la matrice d'aria (quella tra *droplet* e *droplet* può essere a tutti gli effetti trascurata)
4. l'interazione con le superfici dell'ambiente
5. la loro evoluzione temporale secondo le condizioni climatiche interne (processo di evaporazione)

Per quanto riguarda il diametro e la forma delle goccioline emesse, questo argomento è stato estensivamente studiato in letteratura e le conclusioni non sono ancora univoche. In [58] si propone una distribuzione non omogenea che spazia tra diametri di $d = 0.8 \pm 0.08\mu m$ e $d = 5.5 \pm 1\mu m$ per quelle più piccole (ovvero tali particelle che hanno buona probabilità di diventare *droplet nucleii*). Lo studio si ferma a un $d = 20\mu m$ e ne analizza la concentrazione emessa. Questo ultimo dato può essere molto importante per l'analisi del termine $S_k$ nell'equazione 5.9. Una proposta di formulazione per tale distribuzione è data in [61]:

$$N_e(d) = \frac{B}{d} \exp\left[-\frac{(\ln d - \hat{\mu})^2}{2\hat{\sigma}^2}\right]$$

dove il termine $B$ è una costante di normalizzazione e i valori $\hat{\mu}$ e $\hat{\sigma}$ sono relativamente a $\ln d$ il valore medio aspettato (media geometrica) e la deviazione standard (`GSD` - *geometric standard deviation*). Come si evince subito questa è una distribuzione log-normale, ma viene suggerito che anche altre funzioni (come ad esempio quelle esposte in 5.1.3) possono essere adattate per rappresentare correttamente il problema. Questo è a seguito della carenza di risultati univoci oggettivi e dell'ambiguità e incertezza che ancora aleggia sull'argomento in tutta la comunità scientifica. È di centrale importanza anche il comportamento respiratorio degli occupanti, che deriva sicuramente dall'utilizzo che viene effettuato dall'ambiente e può sensibilmente influenzare i risultati finali. Infatti ad esso è strettamente legata la generazione di particelle in ambiente e il loro andamento nelle immediate vicinanze del soggetto infetto (punto 2. dell'elenco precedente). Questo tende a cambiare molto (anche nelle stesse stanze) al variare del tempo e per una simulazione semplice deve essere tendenzialmente reso omogeneo ed approssimato. Ad esempio all'interno di un aula è possibile stimare un comportamento sedentario degli studenti e un'attività di parlato continua del professore. In ogni caso un ciclo di respirazione è in una persona un processo molto complesso e dinamico. La sua simulazione è di sostanziale difficoltà in quanto andrebbero presi in considerazione numerosi dettagli come ad esempio la distribuzione della velocità lungo il profilo della bocca, i periodi di esalazione, inalazione ed un'eventuale pausa come presentata in figura 5.4. In linea di principio per il ciclo respiratorio si può prendere una funzione sinusoidale del tipo:

$$Q_{in}(t) = Q_{max} \sin(2\pi t/T)$$

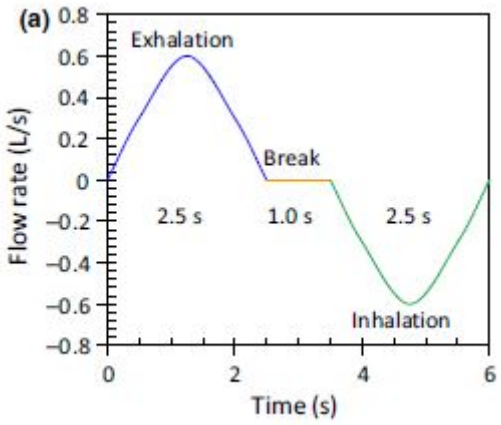



Figura 5.4: Ciclo respiratorio da [59]

dove con $Q_{max}$ si intende il valore di picco in figura 5.4 e $T$ è il periodo (di $5s$ escludendo la pausa). Per quanto concerne infine anche l'ingestione di patogeno la respirazione gioca un ruolo fondamentale: basti pensare che l'espirazione immette aria che si può definire pulita nelle immediate vicinanze del soggetto e quindi opera a tutti gli effetti un processo di "pulizia" della zona immediatamente circostante il suscettibile. È possibile introdurre due parametri $\eta_a$ e $\eta_f$ che ne descrivono in maniera più completa l'andamento. Questi indicano dei rendimenti, rispettivamente *l'inalabilità* e l'effetto delle mascherine respiratorie (DPI). Tali valori rientrerebbero

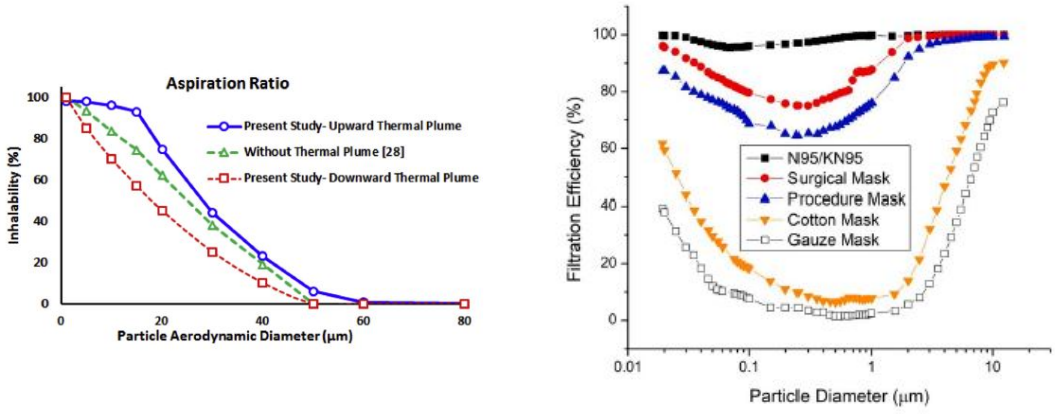



Figura 5.5: Approssimazioni grafiche dei parametri di inspirazione

nell'analisi dell'inalazione da parte del suscettibile di patogeno in aria secondo la formulazione:

$$\phi_{inhaled}(d,t) = \phi_l(d,t)\eta_a(1-\eta_f)$$

dove con i termini $\phi$ si indicano le concentrazioni di particelle (inalata o locale). Ne è portata una prima approssimazione grafica percentuale in figura 5.5. La respirazione detta in ultimo anche la direzionalità e velocità d'ingresso delle *droplets* in ambiente. Quest'ultima si attesta, durante un'attività respiratoria semplice tra i 2 e i $5m/s$, anche se studi sperimentali riporterebbero valori leggermente inferiori ($\leq 2m/s$). Tale valore aumenta sostanzialmente durante il parlato ($v \leq 16m/s$) o eventi respiratori acuti ($v \leq 40m/s$). L'angolo di emissione rispetta tendenzialmente la relazione $0° \leq \alpha \leq 40°$ con picchi eventuali fino a 60° in concomitanza di colpi di tosse o starnuti.
Le interazioni come presentate nel punto elenco all'inizio della sottosezione saranno calcolate dal software di simulazioni secondo le leggi di conservazione come in 5.1.3. Infine i processi evolutivi, sebbene non verranno trattati in questo lavoro, sarebbero l'ultimo punto e anche il più complesso di una simulazione completa sul comportamento microscopico delle *droplets*. Questa analisi deve tenere necessariamente conto non solo delle secrezioni delle ghiandole salivari, ma anche della presenza di una miscela di componenti orali fluide all'interno delle particelle. Infatti le *droplets* sono composte anche di:

- fluidi gengivali
- secrezioni bronchiali e nasali
- siero e derivati del sangue
- batteri e prodotti batterici
- virus e funghi
- cellule epiteliali
- altre componenti cellulari
- residui di cibo

Questi possono giocare un ruolo più o meno importante nella determinazione della tensione superficiale (presenza di tensioattivi), della viscosità (che controlla poi la coalescenza e il *drag factor*) e della contagiosità effettiva della particella (effetto di protezione del patogeno a seguito dell'evaporazione). Una formulazione interessante del comportamento evolutivo è data in [61]. Poiché esula dalle simulazioni, questa teoria verrà ora brevemente presentata, ma non più ripresa. Questa si basa sul concetto di *tempo limite*, ovvero un valore di $t$ dopo il quale le *droplets* hanno effettuato tutti i processi che dipendono dal loro diametro. Si faccia riferimento alla figura 5.6. Nella figura a sinistra si legge in ascissa si trova il diametro delle particelle e in ordinata il tempo trascorso dalla loro generazione e ingresso in ambiente. Le curve di diverso colore (al variare del parametro $k'$) rappresentano i due

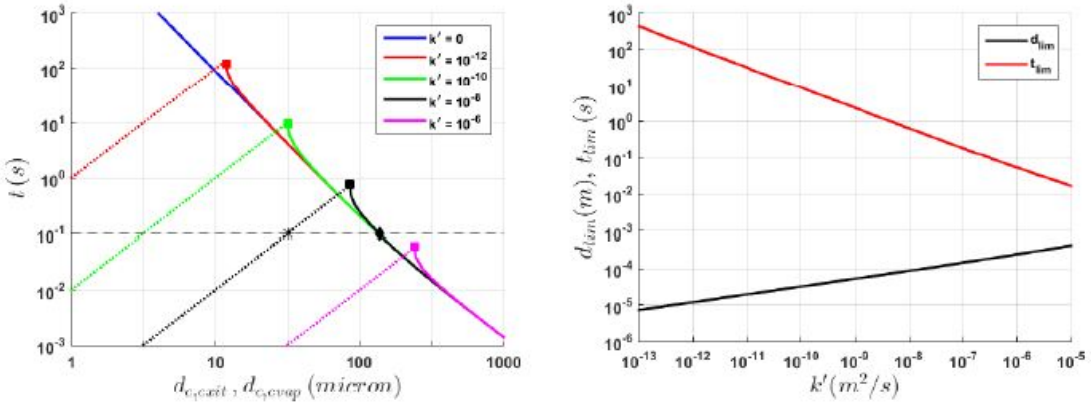



Figura 5.6: Teoria del tempo limite da [61]

processi possibili: evaporazione o uscita della droplet da un volume di riferimento $Q(t)$. La linea tratteggiata infatti è il primo dei due e mi dice, al variare del diametro e di $k'$, quanto tempo passa prima della completa evaporazione della droplet. Allo stesso modo la linea continua mi dice quanto tempo deve passare prima che la particella esca dal volume di riferimento (ad esempio una sfera intorno alla testa dell'occupante). Il punto di intersezione tra le curve è quello di coordinate $(d_{lim}, t_{lim})$. L'ascissa determina il valore di diametro critico che segna la distinzione tra le due "sorti". La sua ordinata è invece rappresentativa del tempo massimo richiesto per il completamento di tutti i processi evolutivi. Come esempio si pensi di voler analizzare la concentrazione di droplets nel volume $Q(\tilde{t})$ ad un tempo $\tilde{t}$. Questa può essere identificata in due casi $\tilde{t} \leq t_{lim}$ e $\tilde{t} > t_{lim}$. Nel grafico si pensi di tracciare una linea orizzontale che interseca le due curve in $d_{evap}(\tilde{t})$ e $d_{exit}(\tilde{t})$. Dunque:

$$\phi(d, t \leq t_{lim}) = \begin{cases} \frac{1}{Q(t)} N_e(d\psi^{-1/3}) & d \leq d_{evap}(t) \\ \frac{1}{Q(t)} N_e(\sqrt{d^2 + k't}) & d_{evap}(t) < d < d_{exit}(t) \\ 0 & d \geq d_{exit}(t) \end{cases}$$

Il processo è ancora in corso sono dunque presenti particelle già evaporate (prima formulazione), particelle ancora in evoluzione (seconda formulazione) e particelle uscite (terza formulazione). La concentrazione dipende dunque dal diametro che stiamo analizzando e dal tempo preso in considerazione. Al contrario si ha:

$$\phi(d, t > t_{lim}) = \begin{cases} \frac{1}{Q(t)} N_e(d\psi^{-1/3}) & d \leq d_{lim} \\ 0 & d > d_{lim} \end{cases}$$

In questo secondo caso tutte le particelle sono evaporate o uscite dal volume, discriminate dal loro diametro limite. La funzione $N_e(d)$ ritorna il numero di particelle

a quel diametro. Il valore di $\psi$ tiene conto della riduzione di dimensioni dovuta all'evaporazione, in funzione dei componenti volatili della *droplet*. Il parametro $k'$ è la *effective evaporative diffusivity* e indica la tendenza delle particelle a evaporare secondo alcuni ulteriori parametri (tra cui $Nu$ e $\rho$). In figura 5.6, sulla destra viene riportata la dipendenza dei valori di $t_{lim}$ e $d_{lim}$ da $k'$.

# Capitolo 6

# Impostazione delle simulazioni applicative

A valle dello studio effettuato nel capitolo precedente ci si prepara ora all'impostazione della simulazione in tutte le sue parti. Nello specifico si tratterà di ognuno di quei passaggi che sono previsti nella composizione di un processo simulativo efficace. Nel caso in studio i passi seguiti sono:

1. **Geometria**: la creazione delle geometrie e domini di studio
2. **Fisica e Condizioni al contorno**: scelta dei problemi fisici da risolvere e degli input e output
3. **Mesh e studio di indipendenza**: generazione corretta della griglia e analisi
4. **Fasi Lagrangiane e Injector**: posizionamento e direzione dei generatori di *droplets*
5. **Run della Simulazione**: scelta dei parametri di tempo e lancio della simulazione

Le sezioni seguiranno questo schema e verranno presentate per ogni punto le scelte eseguite e le soluzioni adottate.

## 6.1 Costruzione della Geometria

A valle di uno studio come quello proposto da questo lavoro, ci si potrebbe aspettare che la simulazione venga effettuata su un'aula od assimilabile. Le operazioni CFD presentano notevoli difficoltà di implementazione sui grandi ambienti per via degli errori di discretizzazione introdotti in 5.1.2. Inoltre il grado di dettaglio necessario

e la grandissima quantità di materiale prodotta, nonché necessaria, per la descrizione completa della situazione di contagio in grandi ambienti come quelli universitari complicano la situazione sia a livello teorico che pratico. Sarebbero infatti necessari calcolatori estremamente potenti per riuscire a simulare correttamente una situazione come questa appena descritta. Gli studi proposti in bibliografia fanno utilizzo di *super-computer* per inglobare nella stessa soluzione un trasporto di particelle aerosol (in numero elevatissime e in dimensione ridottissime) e la movimentazione di flussi d'aria macroscopici. A seguito del fatto che un lavoro così risulterebbe dispendioso si è optato in prima battuta, con la speranza di ampliare in seguito il discorso negli sviluppi futuri, per un ufficio del dipartimento di energia `DENERG` della Sede Centrale del Politecnico di Torino. In figura 6.1 si trova la piantina dell'ambiente in analisi. Sono presenti due scrivanie per i due occupanti nella parte alta del disegno, con le relative sedie. Il profilo di tale mobilia è particolare ed è stato quotato in un secondo documento a parte. Si trovano anche due mobili più lunghi sulle pareti (ipoteticamente delle librerie) e un tavolo centrale con quattro postazioni per riunioni o ricevimenti. È proposta anche la posizione del cestino. Nel muro inferiore è situata una porta, mentre sulla parete ad esso opposta sono locate due finestre grandi non rappresentate in figura. Le dimensioni totali sono 630x382 il che fa questo ambiente di una dimensione ridotta, ma comunque adatta allo studio. Tutti i valori possono essere ricavati dal file *.dwg* e sono conseguentemente riportati nel software di simulazione. Questo, infatti, contiene al suo interno un proprio programma di modellazione 3D che può essere usato per la composizione della geometria. In figura 6.2 è presentata la geometria finita. Si noti il dettaglio della scrivania (con il posto per le gambe) e la semplicità proposta per la mobilia (sedie, finestre, tavolo centrale, librerie) che deve essere parte di questo studio, ma non ne deve appesantire la ricerca dei risultati. Infatti questa verte principalmente sull'andamento delle particelle in aria per la movimentazione dell'aria che è sì influenzata dalla posizione dei mobili, ma non esageratamente. Sono introdotti anche i due occupanti e degli oggetti più specifici sopra i tavoli. Questi sono stati modellati in separata sede e importati su `STAR-CCM+`. In questa rappresentazione sono evidentemente mancanti i terminali in ambiente. Lo studio prevede alcune modalità di ventilazione specifiche:

- Terminale di tipo Fan Coil posto sotto le finestre. Il termoventilconvettore è la classica opzione di ventilazione in uffici ed ambienti assimilabili. La posizione al di sotto delle pareti vetrate lo metterebbe però troppo vicino agli occupanti. Si è voluto comunque procedere con questa soluzione in quanto in linea con le principali direttive. Gli effetti di questa scelta poco oculata verranno fuori in abbondanza durante l'analisi dei risultati

- Diffusore a soffitto al centro della stanza. L'ambiente è indicativamente piccolo per una distribuzione dell'aria a soffitto (a meno della presenza di un impianto di distribuzione d'aria nel contro-soffitto per più ambienti). Come

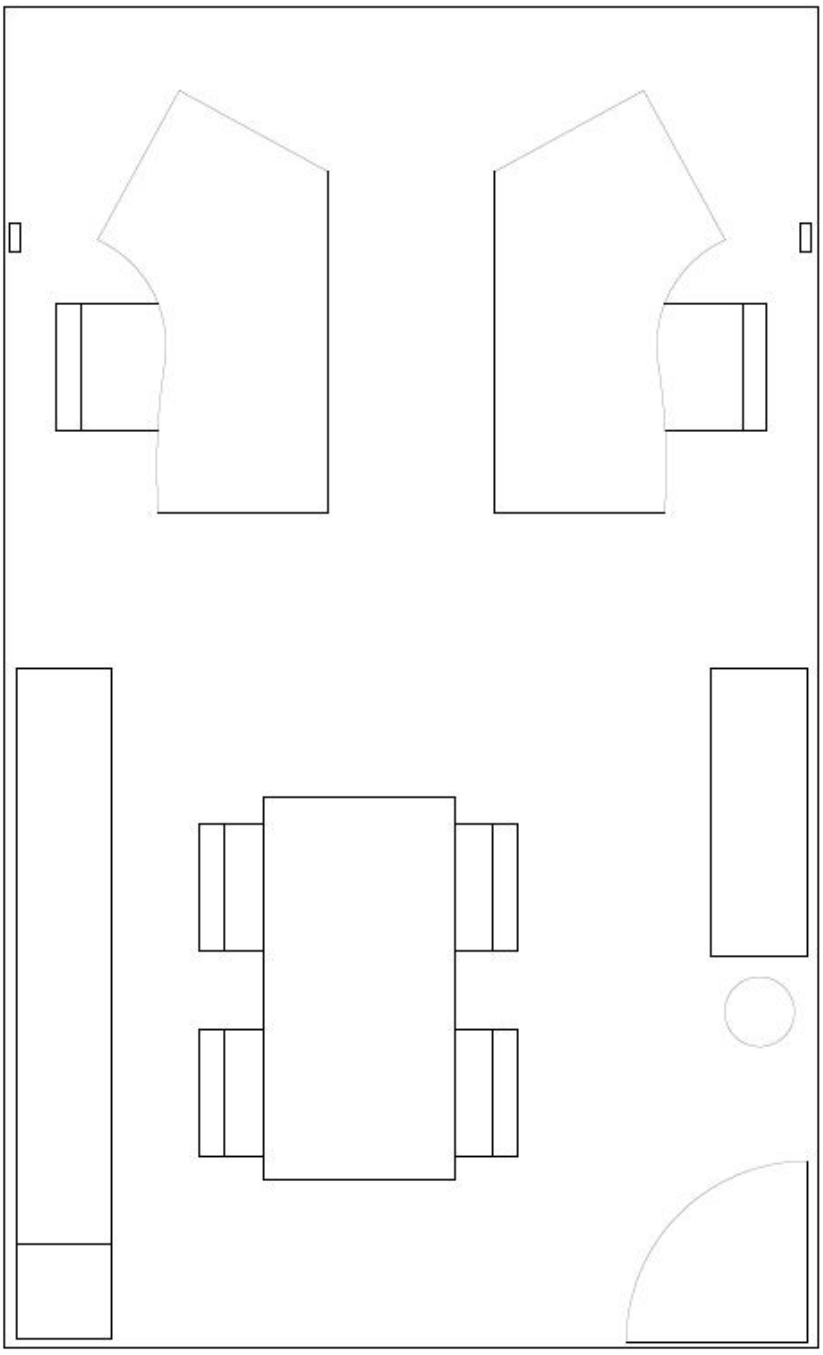


Figura 6.1: Piantina schematica dell'ufficio in analisi

anche nel caso precedente la scelta effettiva di un sistema di areazione tenderebbe a ricadere altrove. Nonostante ciò questo studio vuole denotare il diverso comportamento delle particelle e si procede comunque

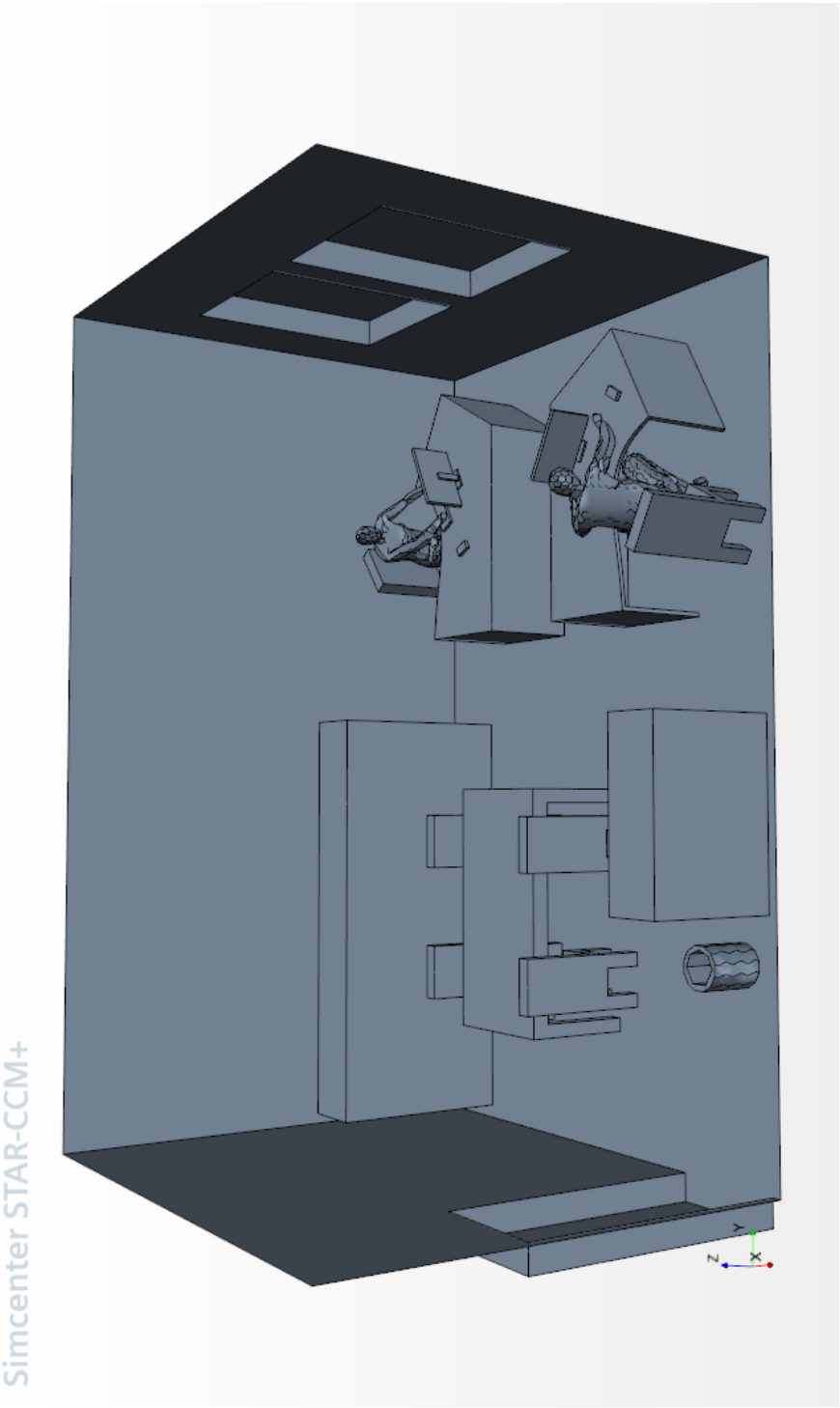



Figura 6.2: Geometria proposta per l'ufficio in analisi

In figura 6.3 è possibile vedere i due terminali posti in ambiente. Come si leggerà poi in seguito i colori rappresentano le zone dove è prevista immissione o estrazione dell'aria. Nelle figure 6.4 e 6.5 è possibile identificare i due terminali inseriti nella

Figura 6.3: Terminali inseriti in ambiente nelle due geometrie

geometria. A seguito del fatto che queste modalità di ventilazione meccanica forzata sono solo ipotizzate e non verranno realmente attuate anche le posizioni e dimensioni precise sono a loro volta scelte arbitrariamente. In ogni caso, grazie all'alta simmetricità di queste componenti, la geometria risulta plausibile e piacevole.

## 6.2 Fisica e condizioni al contorno

La scelta dei modelli fisici per la simulazione è un processo che indica al software quali equazioni deve risolvere e dunque come raggiungere la soluzione. Un'accurata identificazione del problema e una sua conoscenza dettagliata permettono di effettuare scelte oculate. Queste concernono ad esempio le equazioni che governano il flusso d'aria, il modello di turbolenza, la presenza della forza di gravità, l'algoritmo di risoluzione temporale, lo scambio termico, le fasi lagrangiane (cfr. 5.1.3) ed altri ancora. Nel progetto sviluppato in questo lavoro molte di queste scelte sono state lasciate di *default* al software senza andare ad appesantire e complicare la simulazione e la sua impostazione. Nello specifico:

- L'aria è stata assunta come un gas ideale, governato dalle equazioni ad esso collegate. I suoi parametri come ad esempio calore specifico, viscosità dinamica e conduttività termica sono quelli preimpostati

- Poiché il problema si svolge anche lungo la coordinata temporale si è optato per un modello *Implicit Unsteady*, come descritto in 5.1.2

- Le equazioni di turbolenza sono le `RANS` (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), risolte secondo l'algoritmo $k - \epsilon$ *turbulence*

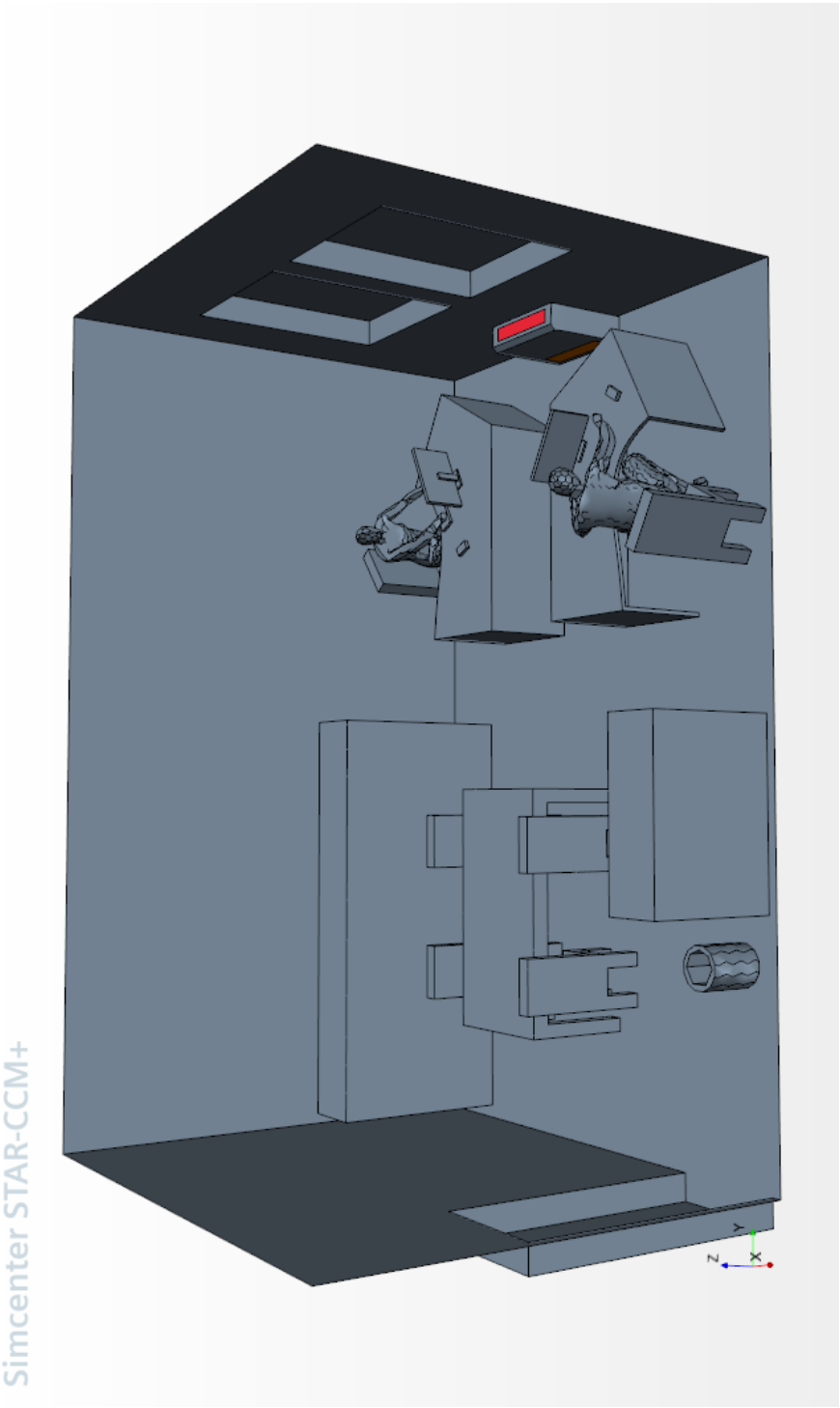



Figura 6.4: Geometria proposta per l'ufficio in analisi con Fan Coil sotto le finestre

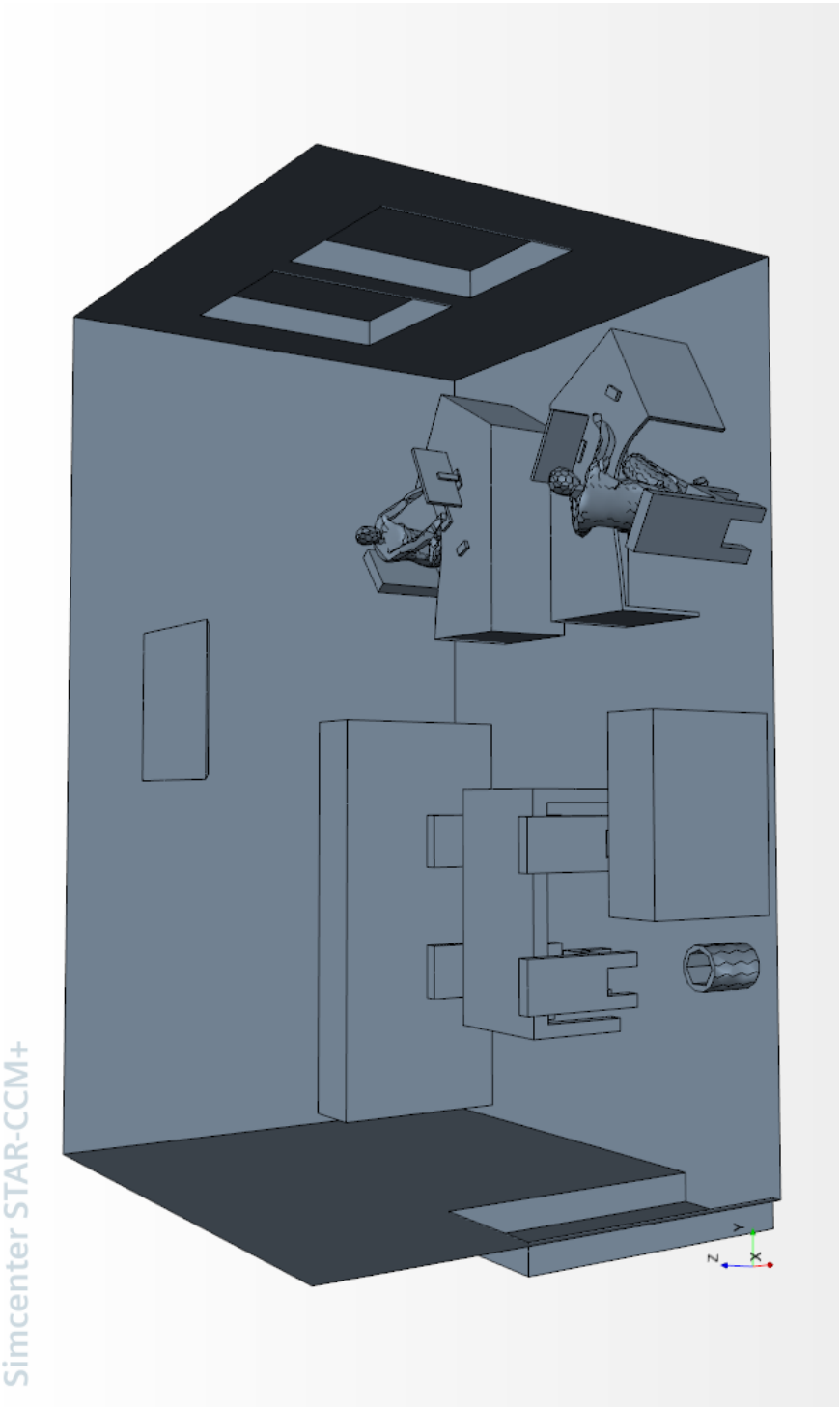



Figura 6.5: Geometria proposta per l'ufficio in analisi con il diffusore a soffitto

- Il flusso risulta segregato. Questo si oppone alla scelta di un *coupled flow* dove più flussi si scambiano forze ed energie all'interno del dominio. È chiaro che l'unico studio ricade sull'aria

L'introduzione di una fase lagrangiana come le *droplets* prevede la complicazione della fisica su due livelli. Infatti anche per quest'ultima è previsa la scelta di modelli di comportamento e risoluzione equazioni.

- In primis la fase è considerata una *material particle* opposto ad una *massless particle*. La prima si avvale di una massa e dunque di una scambio di forze ed energia più complesso, mentre le seconde seguono un modello più semplice ed ideale
- Le particelle sono considerate sferiche e a densità costante
- Le fasi sono state assimilate a goccioline d'acqua e ne riprendono in maniera standard i parametri
- È inserito anche il modello di scambio energetico. Le particelle sono infatti inserite in ambiente ad una temperatura sostanzialmente superiore e tale fattore impatta sul loro percorso
- Il trasporto è simulato per mezzo della *drag force*. L'introduzione di ulteriori forze (da 1.3.1) influisce limitatamente sul risultato finale
- Fra i modelli va anche inserito la modalità con cui si vuole salvare a valle del *run* le proprietà e le posizioni delle particelle sospese. Si è optato per un *track file* che contiene al suo interno informazioni riguardo la *particle centroid position* e *particle velocity*

È infine anche possibile impostare dei diversi comportamenti per le varie modalità di condizioni al contorno. Nello studio si sono lasciate quelle di *default* (*Phase Impermeable* e *Wall*).
Tali scelte completano la descrizione del problema agli occhi del software, che ora è in grado di richiamare i *solver* adeguati per la determinazione del risultato. Questi sono però limitati alla conoscenza precisa e globale delle condizioni al contorno. Le *boundaries* sono infatti fondamentali per l'ottenimento di una simulazione coerente con la realtà e devono essere scelte accuratamente e in relazione agli eventuali studi sperimentali collegati. Nello studio in questione:

- Le zone rosse in figura 6.3 sono le *Velocity Inlet*. Da queste viene immessa in ambiente l'aria ad una velocità di $3m/s$ ed un temperatura di $30°C$
- Nella stessa immagine le zone arancioni sono le *Pressure Outlet*. Non vengono indicati altri parametri, ma si vuole far capire al software che in tali superfici è previsto una uscita per l'aria

- In corrispondenza della bocca del manichino infetto (quello più lontano nelle immagini della geometria) è presente un'ulteriore condizione di *Velocity Inlet*. Alla luce dei ragionamenti effettuati nella sottosezione 5.2.3 viene simulato un respiro ogni $4s$ dalla durata di $2s$ per una velocità immessa di $3m/s$ ad un temperatura di $35°C$. Questa condizione è fondamentale per la descrizione corretta del comportamento delle particelle immesse nelle immediate vicinanze del manichino. Laddove infatti questa non venga rispettata, in prossimità della bocca, si ha che le *droplets* non riescono a vincere la presenza di un flusso convettivo ascendente e hanno un percorso che immediatamente le vede schizzare verso l'alto

- Una simulazione corretta del processo di respirazione è, come già descritto, molto complessa. Qualora si volesse procedere con un'analisi più approfondita si dovrebbe prendere in considerazione anche l'effetto di risucchio di aria dovuto all'inspirazione, che quindi toglierebbe parte delle droplets immesse. Poiché uno studio del genere prevederebbe una quantità di *parcels* esageratamente elevata è stato scartato

- Tutte le superfici sono considerate *Walls*. Questo descrive al software l'impossibilità di attraversamento. Ad alcune è stata aggiunta anche l'indicazione della temperatura, laddove queste sono importanti per lo studio del moto dell'aria. Queste includono: i manichini posti ad una temperatura di $30°C$, le finestre a $8°C$, porta e pareti a $20°C$

- Tutte le altre sono invece definite *Adiabatic Walls* e non prevedono scambi termici. Queste includono: le facce dei terminali non adibite a moto dell'aria, gli oggetti posti sulle scrivanie (monitor, tastiere e mouse) e la totalità della mobilia (sedie, tavoli, librerie, cestino)

- Infine si impongono le condizioni iniziali in ambiente. Queste prevedono un moto d'aria nullo e una temperatura iniziale di $22°C$, scelta sufficientemente vicina a quella di equilibrio, ma abbastanza lontana da permettere al software di instaurare un regime proprio

## 6.3 Mesh e Studio di Indipendenza

La generazione della griglia di calcolo, in inglese *Mesh*, è un altro passaggio cruciale per l'ottenimento di una soluzione congruente alla realtà. Questa infatti identifica in maniera principale il grado di dettaglio che si vuole raggiungere ed è strettamente collegata alla nascita di errori numerici e incoerenze. L'equilibrio tra costo computazionale e rappresentazione raffinata può essere stilato per mezzo di quello che viene chiamato `Studio di Indipendenza della Mesh`.

Nel lavoro qui presentato si è optato per una *mesh* semplice e automatica, poliedrica con due strati prismatici al confine tra due *patch* non omogenee. È stato anche inserito un *surface remesher* per la definizione della griglia sulle superfici. Se questo primo passaggio può sembrare banale, quello che differenzia una mesh ben costruita da una mediocre sono sicuramente i *custom controls*. Questi includono le opzioni di raffinamento in determinazione zone dello spazio e del piano dove si concentra il problema. In figura 6.6 si può vedere la mesh scelta e il dettaglio cilindrico costruito attorno al manichino. Si è infatti optato per una riduzione della *base size* della mesh in un cilindro di altezza $1.7m$ e raggio $1m$ con asse coincidente all'occupante. Sebbene sia necessario solamente nell'intorno della persona infetta, questa operazione è stata effettuata per entrambi gli occupanti, qualora se ne volesse cambiare la posizione. Viene inizialmente impostata una *base size* di $12cm$ con riduzione al 75% per le zone più dettagliate. Il controllo cilindrico è effettuato anch'esso in funzione di tale parametro con un valore del 50% e nessun ulteriore raffinamento. Sono introdotti altri *surface controls* per i terminali in cui si è voluto portare la dimensione base della griglia anch'essa al 50% per un maggior controllo sull'introduzione ed estrazione dell'aria.

### 6.3.1 Studio di indipendenza della mesh

Lo studio di indipendenza della mesh riguarda la determinazione di alcuni parametri fissi, al variare della *base size* della griglia. Viene calcolato un errore percentuale secondo la semplice formulazione:

$$e_{\%} = \frac{|x_i - x_{rif}|}{x_{rif}}$$

e se ne identifica un valore medio massimo accettabile. Per questo lavoro tale $\overline{e}_{\%max} = 3\%$. Lo studio è unico per entrambe le situazioni ed è stato effettuato per il caso con FanCoil. Sono state dunque create delle *Point Probe* in determinate posizioni di rilievo nella stanza: sopra le teste dei due occupanti e sopra il fan coil. Questi oggetti ritornano la temperatura dell'aria in quel punto al variare del tempo. Per questa analisi è stato escluso il *solver* relativo alle fasi lagrangiane che non sono quindi state considerate. Il tempo di *run* è stato imposto pari a $120s$ con $\Delta t = 3s$. Sono stati prodotti tre grafici:

- Il grafico dei *residuals* sull'errore numerico
- Il grafico della temperatura media sul volume della stanza
- Il grafico con i valori di temperatura nelle tre probes

L'ultimo dei tre è stato esportato in un foglio di calcolo per effettuare la computazione dell'errore percentuale. Calcolando la media dei valori in tabella 6.8 si ottiene:

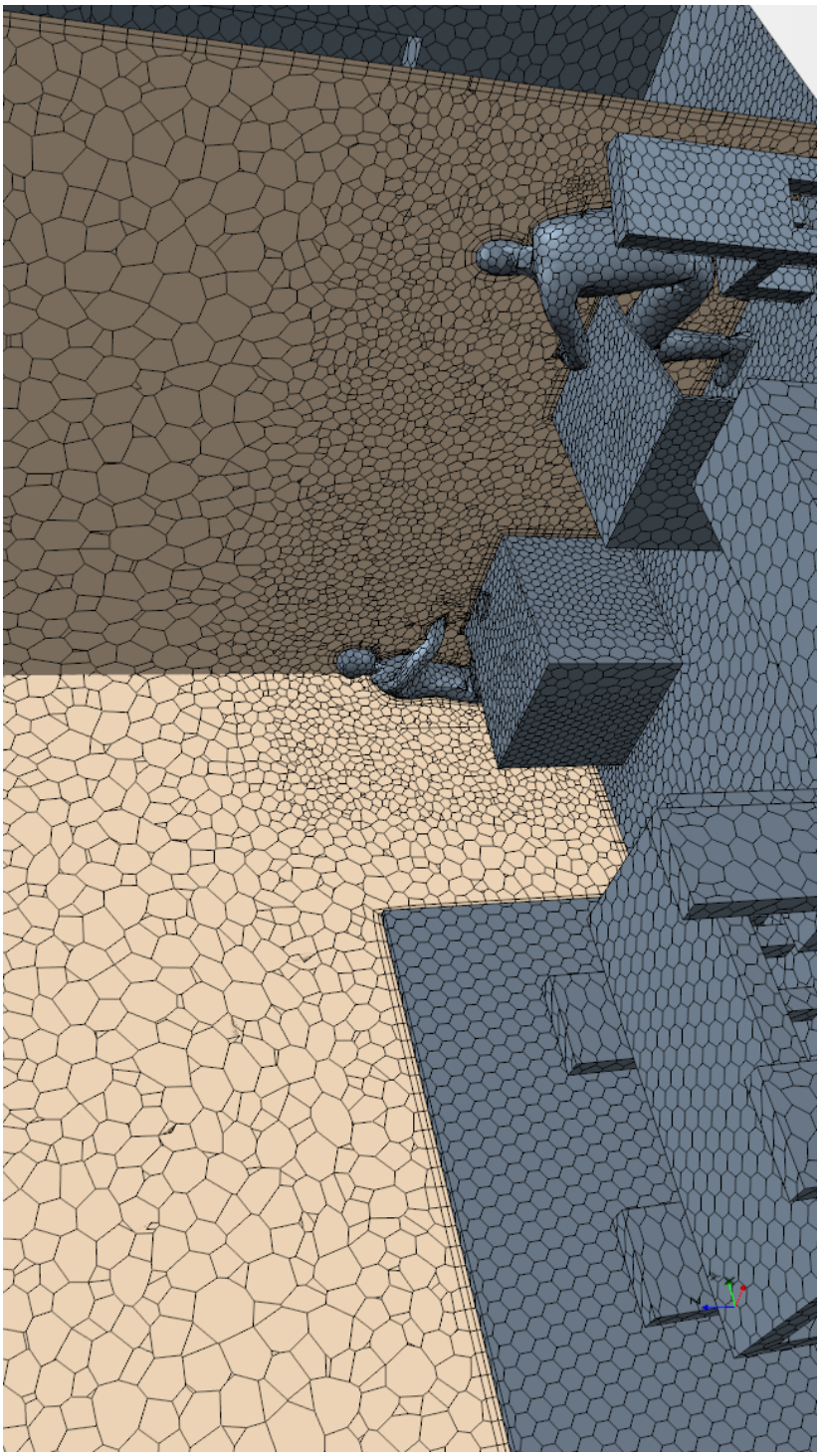
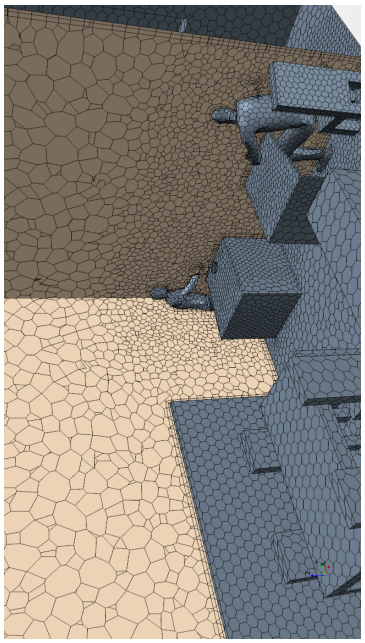
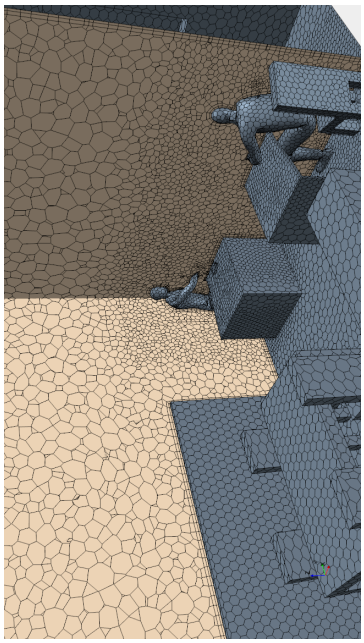


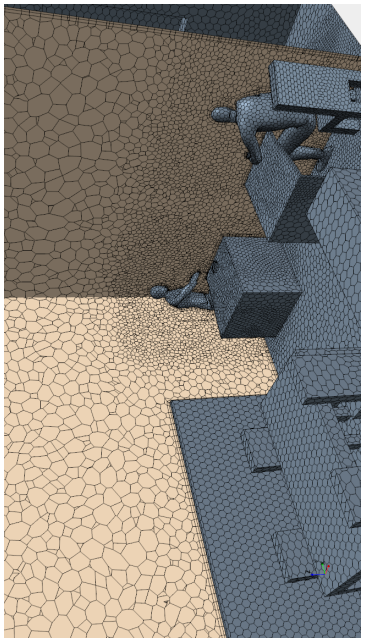
Figura 6.6: Mesh imposta per l'ufficio



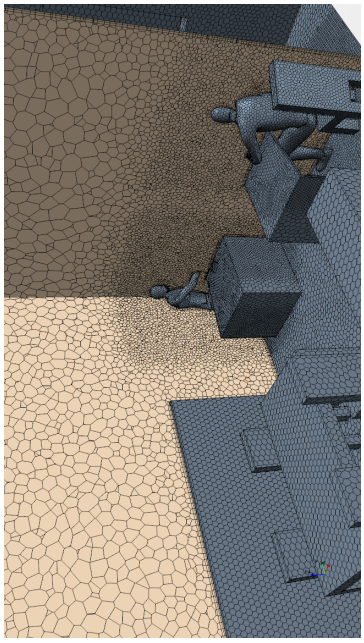
(a) Mesh Base Size 12 cm



(b) Mesh Base Size 10 cm



(c) Mesh Base Size 8 cm

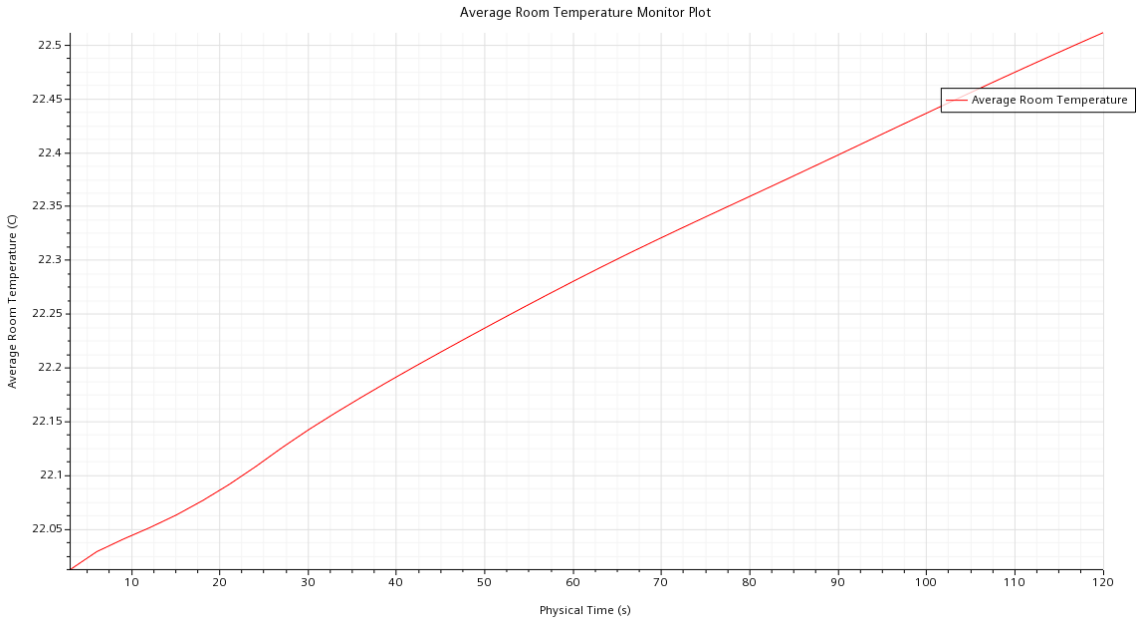


(d) Mesh Base Size 6 cm

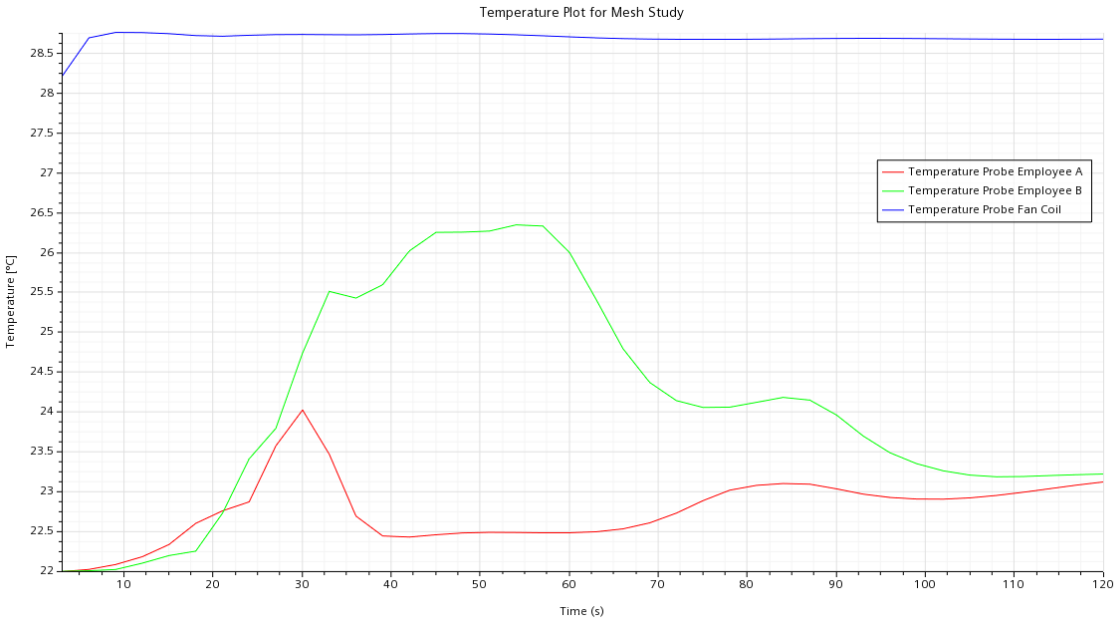
Figura 6.7: Composizione delle mesh al variare della *base size*. Al diminuire di tale parametro si noti il grado di dettaglio del controllo cilindrico

| | *Mesh Base Size* [cm] | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 12 | | | 10 | | | 8 | | | 6 | | |
| Cells: | 138346 | | | 209921 | | | 348561 | | | 680203 | | |
| Faces: | 749537 | | | 1186770 | | | 2009743 | | | 4074169 | | |
| Vertices: | 579283 | | | 934829 | | | 1597432 | | | 3287016 | | |
| | Errore percentuale sul riferimento | | | | | | | | | | | |
| Time [s] | PEA | PEB | PFC | PEA | PEB | PFC | PEA | PEB | PFC | PEA | PEB | PFC |
| 3 | 0,12% | 0,23% | 7,19% | 0,12% | 0,09% | 1,70% | 0,43% | 0,29% | 0,21% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 6 | 0,04% | 0,10% | 6,52% | 0,13% | 0,07% | 1,58% | 0,14% | 0,36% | 0,80% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 9 | 0,30% | 0,03% | 7,26% | 0,20% | 0,11% | 1,85% | 0,25% | 0,22% | 0,85% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 12 | 0,65% | 0,34% | 7,48% | 0,24% | 0,37% | 1,86% | 0,61% | 0,11% | 0,94% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 15 | 0,23% | 0,14% | 7,37% | 0,14% | 0,46% | 1,87% | 0,61% | 1,22% | 0,95% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 18 | 0,44% | 3,33% | 7,26% | 0,06% | 0,07% | 1,79% | 0,23% | 8,07% | 0,87% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 21 | 1,44% | 6,71% | 7,29% | 0,39% | 1,48% | 1,77% | 0,82% | 8,53% | 0,80% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 24 | 2,09% | 5,13% | 7,40% | 2,15% | 1,45% | 1,81% | 1,92% | 5,45% | 0,80% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 27 | 1,27% | 4,08% | 7,46% | 1,20% | 1,54% | 1,85% | 0,70% | 5,38% | 0,81% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 30 | 1,18% | 0,04% | 7,46% | 0,65% | 1,42% | 1,88% | 0,72% | 2,92% | 0,80% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 33 | 3,33% | 3,28% | 7,41% | 1,98% | 4,55% | 1,87% | 0,56% | 0,27% | 0,78% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 36 | 5,61% | 2,37% | 7,37% | 3,33% | 4,14% | 1,84% | 2,86% | 0,41% | 0,76% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 39 | 4,95% | 1,59% | 7,36% | 2,96% | 3,98% | 1,82% | 3,14% | 0,61% | 0,77% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 42 | 2,99% | 2,02% | 7,41% | 2,02% | 4,32% | 1,83% | 2,38% | 2,76% | 0,80% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 45 | 1,73% | 2,38% | 7,48% | 1,37% | 3,69% | 1,85% | 1,50% | 4,09% | 0,84% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 48 | 1,28% | 2,72% | 7,56% | 1,09% | 2,36% | 1,87% | 0,98% | 4,33% | 0,86% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 51 | 1,54% | 3,30% | 7,63% | 0,98% | 1,62% | 1,88% | 0,90% | 4,42% | 0,87% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 54 | 2,54% | 3,84% | 7,68% | 0,93% | 1,67% | 1,90% | 1,18% | 4,65% | 0,86% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 57 | 4,07% | 3,86% | 7,69% | 1,05% | 1,75% | 1,91% | 1,70% | 4,59% | 0,83% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 60 | 5,60% | 2,60% | 7,69% | 1,47% | 0,57% | 1,90% | 2,46% | 3,47% | 0,80% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 63 | 6,72% | 0,24% | 7,66% | 2,17% | 1,76% | 1,88% | 3,36% | 1,31% | 0,75% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 66 | 7,53% | 2,32% | 7,63% | 3,15% | 4,24% | 1,86% | 4,05% | 1,20% | 0,71% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 69 | 8,62% | 4,20% | 7,61% | 4,67% | 5,80% | 1,85% | 4,17% | 3,10% | 0,68% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 72 | 9,75% | 5,28% | 7,60% | 6,73% | 6,53% | 1,84% | 3,66% | 4,12% | 0,66% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 75 | 10,02% | 5,71% | 7,58% | 7,70% | 6,77% | 1,84% | 2,69% | 4,39% | 0,64% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 78 | 9,39% | 5,66% | 7,56% | 6,41% | 6,80% | 1,84% | 1,63% | 3,86% | 0,62% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 81 | 8,46% | 5,08% | 7,54% | 4,63% | 6,53% | 1,85% | 0,77% | 2,65% | 0,61% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 84 | 7,51% | 4,18% | 7,51% | 3,42% | 6,02% | 1,87% | 0,09% | 1,24% | 0,60% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 87 | 6,49% | 3,49% | 7,49% | 2,54% | 5,72% | 1,87% | 0,37% | 0,05% | 0,60% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 90 | 5,44% | 3,17% | 7,46% | 1,95% | 5,95% | 1,88% | 0,52% | 0,56% | 0,59% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 93 | 4,46% | 2,92% | 7,44% | 1,39% | 6,24% | 1,88% | 0,54% | 0,84% | 0,59% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 96 | 3,59% | 2,25% | 7,41% | 0,72% | 5,90% | 1,86% | 0,56% | 1,15% | 0,58% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 99 | 2,78% | 1,27% | 7,39% | 0,06% | 4,94% | 1,85% | 0,59% | 1,47% | 0,58% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 102 | 2,01% | 0,37% | 7,37% | 0,43% | 3,65% | 1,83% | 0,62% | 1,66% | 0,57% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 105 | 1,23% | 0,16% | 7,35% | 0,73% | 2,34% | 1,81% | 0,67% | 1,75% | 0,58% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 108 | 0,52% | 0,36% | 7,35% | 0,88% | 1,25% | 1,80% | 0,74% | 1,79% | 0,58% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 111 | 0,04% | 0,42% | 7,36% | 0,94% | 0,47% | 1,79% | 0,80% | 1,80% | 0,59% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 114 | 0,41% | 0,37% | 7,38% | 0,98% | 0,04% | 1,79% | 0,87% | 1,75% | 0,60% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 117 | 0,61% | 0,24% | 7,39% | 0,99% | 0,36% | 1,79% | 0,92% | 1,64% | 0,61% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 120 | 0,69% | 0,06% | 7,40% | 0,99% | 0,54% | 1,81% | 0,95% | 1,49% | 0,62% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |

Figura 6.8: Risultati numerici dello studio della temperatura per indipendenza mesh




(a) Andamento della temperatura media nella stanza




(b) Andamento nella temperatura per le *Point Probes*

Figura 6.9: Andamento temperature per lo studio indipendenza mesh. Caso *base size* 6 cm

- $\overline{e}_{\%12cm} = 4.42\%$
- $\overline{e}_{\%10cm} = 2.21\%$
- $\overline{e}_{\%8cm} = 1.51\%$

Alla luce della considerazione sull'errore medio massimo consentito si è deciso dunque per una base size di 10cm (come riportata in figura 6.6) e non come inizialmente impostata di 12cm. Questa rappresenta a valle di uno studio semplice un buon compromesso tra richiesta in termini di tempo di calcolo e costo computazionale e grado di dettaglio della soluzione finale.

## 6.4 Fasi Lagrangiane e Injector

L'oggetto di tipologia *Injector* è, all'interno di `STAR-CCM+` come di altri software di CFD, atto allo scopo di inserire, secondo modalità ben definite, le fasi disperse nella matrice continua. I modelli fisici che definiscono le fasi lagrangiane sono già stati descritti in una sezione precedente e ne descrivono completamente la tipologia. È stata stilata la presenza di un'unica fase in quanto le droplets che verrano studiate in questo lavoro sono omogenee in tutto, con l'eccezione delle dimensioni. Per quanto riguarda gli *Injector* questi possono essere di diversa tipologia e comportarsi con modalità differenti. Si elencano ora le caratteristiche dell'oggetto inserito nelle simulazioni in analisi, uguale in tutto per entrambe:

- La caratteristica principale dell'injector è la sua tipologia. Questo può essere un *Part Injector*, un *Point Injector* e molti altri. In questo lavoro si è optato per la seconda elencata. Questa scelta è a valle di alcuni lavori di perfezionamento in prossimità della bocca del manichino infetto. Quest'ultima è infatti modellata in maniera piuttosto approssimata per mezzo di un cono con vertice all'interno della testa dell'occupante e base immediatamente all'esterno. La sezione conica è circolare e il raggio della base è di $6mm$ (alcuni studi riportano infatti che la sezione di una bocca aperta ha all'incirca $A = 100 \div 113mm^2$ che corrispondono proprio ad un raggio di tale valore). L'injector puntiforme è stato posizionato al centro della base del cono, utilizzata anche per la condizione al contorno nella sottosezione precedente. L'alternativa era la scelta di un *Part Injector* in corrispondenza sempre della base circolare. Poiché entrambe le opzioni sono, a parere di chi scrive, accettabili, si è preferita arbitrariamente la prima alternativa
- Per quanto riguarda i *Parcel* si è scelto di inserire un unico *stream*. La teoria dei *parcels* è implementata in software di simulazione per ovviare agli enormi costi computazionali che potrebbero risultare da uno studio multifase. Questa prevede che a ogni istante di tempo l'injector non immetta nel dominio le singole particelle, ma un *parcel*, da considerare come un "agglomerato" di

particelle. A seconda della distribuzione dei diametri al suo interno e dal numero di particelle che contiene questo oggetto si comporta diversamente. È chiaro come l'intero approccio sia dunque di natura fortemente statistica. Il *parcel* media l'andamento di ogni *cluster* di *droplets* a seconda dei diametri ed racchiude in sé tutte le informazioni necessarie per uno studio di semplice implementazione e ridotto costo computazionale. Il singolo *stream* indica che ogni evento respiratorio (uno ogni $4s$) introduce un ambiente un unico parcel

- È indicato il *Particle Flow Rate* (invece che il *Mass Flow Rate* o *Volume Flow Rate* più comuni). Questo accorgimento fa in modo di dire all'injector esattamente quante particelle deve inserire in ogni parcel. Alla luce di alcuni studi sulle concentrazioni [58–60] si è impostato il valore di 70 *particle/parcel*. L'unità di misura della portata di particelle sarebbe a rigor di logica $[s^{-1}]$, ma poiché, tramite l'implementazione di tabelle discrete, si è persa la continuità del tempo non avrebbe senso indicarlo come $17.5s^{-1}$. Una seconda indicazione più corretta potrebbe essere 70 *particle*/$4s$

- Le particelle sono state iniettate perpendicolarmente alla base del cono che rappresenta la bocca e con una velocità di $3m/s$. Questo valore è in ogni caso quasi del tutto indifferente e non cambia il risultato in maniera sostanziale, in quanto le particelle sono immesse contemporaneamente alla fuoriuscita di aria dalla bocca. Infatti quelle appena generate si ritrovano in un flusso estremamente lineare e costante sia in velocità che in direzionalità. Ciò le impone un moto del tutto identico a quello della matrice d'aria circostante, finché questa non viene disturbata dalle forze che la disperdono. È dunque chiaro che se si vuole esulare dalle particelle più pesanti, il valore di velocità di immissione è stato scelto arbitrariamente pari a quello dell'aria

- Un discorso più approfondito è stato invece effettuato per la scelta dei diametri. Questi seguono una distribuzione di Rosin-Rammler come descritta in 5.1.3 con un minimo di $0.4\mu m$, un massimo di $10\mu m$, un valore di riferimento di $5\mu m$ e un esponente della curva di distribuzione pari a 2. Questi valori sono stati centro di numerose prove specifiche in quanto non si vuole escludere la presenza di particelle più pesanti ($\approx 10\mu m$) dall'equazione. Nonostante ciò l'obiettivo riguarda la distribuzione di aerosol ed è quindi stata favorita la generazione di particelle che rientrano nel contagio per via airborne ($\leq 5\mu m$)

- Infine come già indicato le particelle sono immesse in ambiente alla temperatura di $35°C$ per permettere la simulazione anche dello scambio termico con l'aria circostante e le forze che ne conseguono

Quando poi verranno presentati i risultati si noterà proprio come le particelle seguono pedissequamente l'andamento del respiro prima di disperdersi in ambiente e procedere per la loro strada come da equazioni che ne governano il moto.

## 6.5 Run della Simulazione

L'ultimo gradino prima dell'analisi dei risultati è il *run* della simulazione. Per *run* si intende il lancio dei *solver* che iniziano a risolvere le equazioni che governano i domini così come indicate nella preparazione. Questi hanno bisogno di alcuni input, specie di natura temporale, che servono a definire il grado di dettaglio dello studio e la sua durata (fisica e computazionale). Inoltre devono essere descritti dei criteri di stop, che indicano ai *solver* quando la ricerca dei risultati deve terminare. È chiaro che anche in questo ultimo passaggio è necessaria la determinazione di un punto di equilibrio che bilanci la richiesta di lunghe tempistiche per un buon grado di dettaglio e la necessità di mantenere l'analisi corta. Questo secondo bisogno nasce alla luce del fatto che i calcolatori impiegati non hanno una potenza eccessiva e piccoli cambiamenti possono comportare significativi incrementi di durata. Nello specifico questo ultimo step impone la scelta di:

- **Time Step**
  Il $\Delta t$ tra il calcolo di una configurazione e la successiva. Questo rappresenta il tempo fisico della simulazione ed è sicuramente funzione della massima durata richiesta dal calcolo. Può spaziare tra valori piccoli (anche millisecondi) e grandi, qualora i tempi di simulazione fossero più lunghi. In questo lavoro si è scelto di imporre un $\Delta t = 1s$

- **Maximum Physical Time**
  Il massimo tempo fisico di *run*. Questi due primi parametri sono fortemente collegati tra di loro secondo:

  $$n_s = t_{max}/\Delta t$$

  dove con $n_s$ si indica il numero di step richiesti per raggiungere con tale *time step* ($\Delta t$) il determinato *Maximum Physical Time* ($t_{max}$). Questo ultimo va scelto dunque oculatamente a seconda dello studio che deve essere proposto. In questo lavoro: $t_{max} = 900s$, ma come si leggerà in seguito questo non è il vero criterio di stop della simulazione

- **Maximum Inner Iterations**
  Le *Inner Iterations* sono iterazioni interne al *time step* che hanno lo scopo di raffinarne il calcolo delle derivate temporali. Queste sono infatti soggette a forte rumore ed errori numerici e questi ulteriori step che vengono presi hanno come unico scopo la riduzione dei *residuals*. Il suo valore deve quindi essere scelto con attenzione per garantire che i residui siano, al tempo del calcolo del nuovo *time step*, in decrescita. In figura 6.10 si può notare come queste (scelte in questo lavoro pari a 5) garantiscano un numero di passi sufficienti affinché i residui siano in diminuzione. Una scelta errata, ovvero un valore tale che il calcolo del nuovo *time step* avviene in corrispondenza di un picco di *residuals*

può comportare forti errori numerici e possibilmente anche la divergenza della soluzione (ovvero i *solver* non riescono a dare una risoluzione alle equazioni e ad ogni passo il rumore si accumula). L'introduzione delle *Inner Iterations* ($II$) aumenta il numero di iterazioni richieste ($n_I$) in maniera lineare per cui:

$$n_I = II \cdot n_s = II \cdot \frac{t_{max}}{\Delta t}$$

Nel caso in questione posti $\Delta t = 1s$, $t_{max} = 900s$ e $II = 5$ si ottiene un $n_I = 4500$. A seconda della potenza del calcolatore questi 4500 passi possono essere risolti con diverse tempistiche

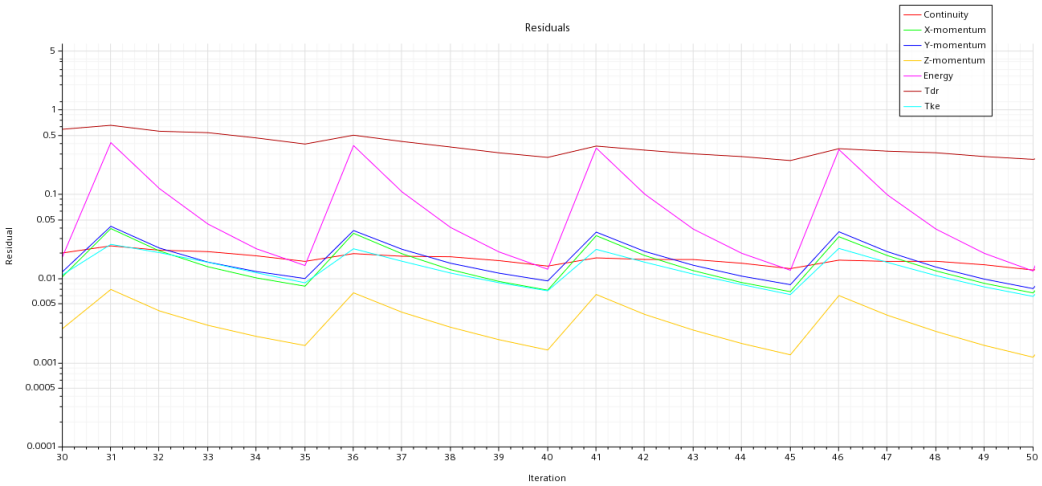



Figura 6.10: Dettaglio dei *residuals* per una delle simulazioni

- **Maximum Steps**
  Come si può facilmente evincere dal nome questo criterio di stop impone un massimo al valore di $n_I$. A seguito del fatto che con quelle precedenti poche relazioni matematiche è possibile a monte del *run* prevedere esattamente il numero di step necessari questo *stop criterion* è stato disabilitato

- **New Monitor Stopper Criterion**
  Questo ultimo punto dell'elenco rappresenta tutti i criteri di stop che possono essere creati in una simulazione a partire da un *monitor*. L'oggetto *monitor* monitora durante il *run* della simulazione una serie di parametri o un valore da essi determinato. È quindi possibile inserire un criterio di stop personalizzato che tiene conto del raggiungimento di specifiche condizioni. Nel lavoro proposto ne è presente uno che indica al software di fermare la simulazione qualora la velocità massima tra le particelle sospese sia nulla, ovvero tutte la *droplets* si sono depositate su una superficie. La stessa cosa poteva essere effettuata con la velocità media

Riassumendo infine le condizioni temporali imposte al run si può dire che:

1. La simulazione parte e per $t < 60s$ non vengono immesse fasi lagrangiane nel dominio, nè è simulato il respiro dell'occupante infetto. Questo minuto serve per stabilizzare il moto dell'aria in ambiente secondo le modalità imposte dalla ventilazione meccanica forzata

2. Da $60s \leq t < 600s$ è previsto un respiro da $2s$ ogni $4s$ che impone nei pressi della bocca del manichino una $v = 3m/s$. L'introduzione di *droplets* avviene in concomitanza del primo dei due secondi di respiro. Ciò comporta una buona definizione del profilo di velocità delle particelle sospese lungo le linee di flusso dettate dalla respirazione

3. Per $t \geq 600s$ l'introduzione di fase lagrangiana è nuovamente fermata. I parcel fino a questo punto immessi sono poco più di un centinaio e le particelle simulate raggiungono la decina di migliaia. Si è pensato che questi valori potessero essere sufficienti ad una simulazione di questo tipo che quindi presenta la situazione di aerosol a valle di una immissione di patogeno di 9 minuti. Come si vedrà dai risultati il tempo di simulazione fisico complessivo supererà di poco la decina di minuti

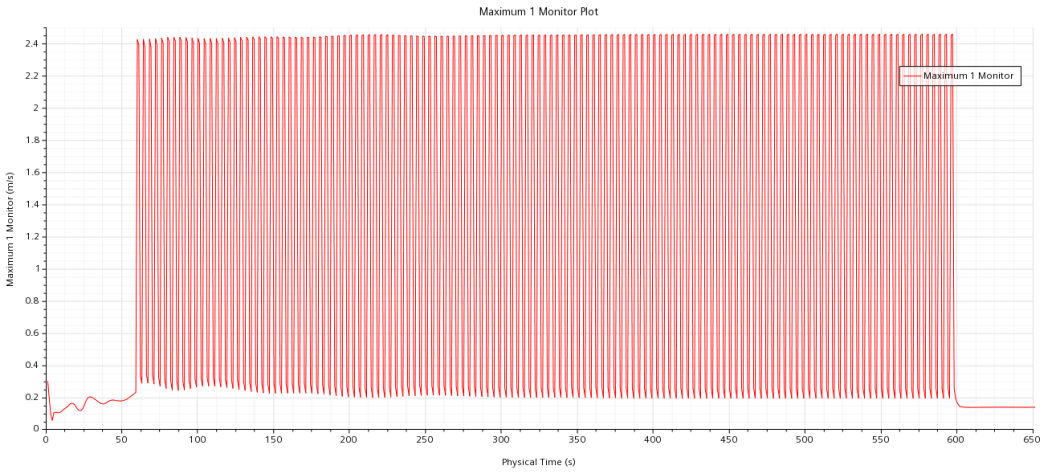



Figura 6.11: Velocità dell'aria nei pressi della bocca del manichino infetto

In figura 6.11 si legge la velocità dell'aria raggiunta nei pressi della bocca del manichino infetto. Questa è per un primo periodo molto variabile in quanto il moto della matrice è ancora in fase di assestamento. Durante la simulazione del respiro presenta dei picchi alti ($v \approx 2.4m/s$) che però sono controbilanciati da valli profonde. Questo significa che in meno di un secondo, a partire dalla fine di immissione dell'aria, la velocità si riduce ai valori propri dello stato di equilibrio. Infine a valle

dei 10 minuti questa è molto stabile e indica il buon raggiungimento dell'equilibrio dinamico.

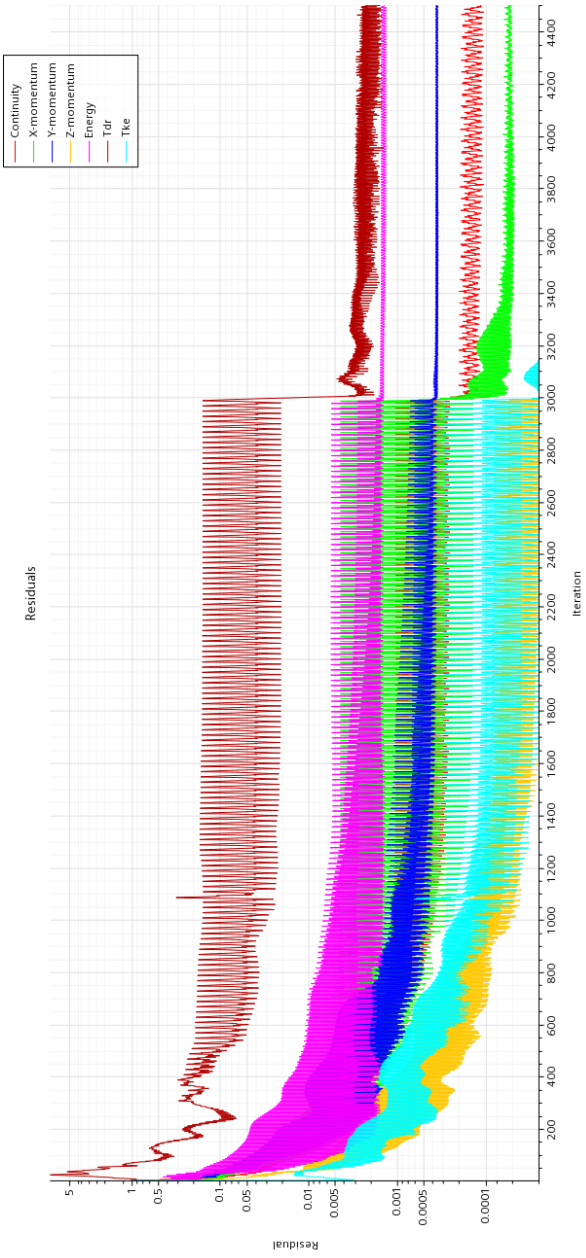



Figura 6.12: *Residuals* di una delle due simulazioni

# Capitolo 7

# Post-processing e analisi dei risultati

Il *Post-Processing* indica quella fase di una simulazione che segue il *run* della stessa. Questo include tutti quei processi di costruzione di risultati comprensibili, visivamente piacevoli e analizzabili. Molte delle procedure che lo compongono devono essere inizializzati a monte del lancio in quanto si avvalgono degli strumenti *monitor* già descritti, che seguono e controllano l'andamento di alcuni parametri durante il *run*. In ogni caso in questo ultimo capitolo si procede alla descrizione di questi nuovi oggetti e si concluderà con l'analisi dei risultati ottenuti, alla luce delle limitazioni imposte. Infine verranno proposti degli sviluppi futuri che, sulla base di quanto inserito in questo lavoro, possono continuarne l'espansione e il miglioramento.

## 7.1 Moto dell'aria e temperatura

Lo sviluppo completo dei moti dell'aria all'interno della stanza è stato permesso grazie ai primi 60 secondi di simulazione. Per essere sicuri che questo sia effettivamente avvenuto lo studio prevede il raggiungimento di alcune condizioni:

1. Flusso perfettamente allineato e alla velocità corretta nei pressi delle condizioni al contorno di *Velocity Input*. Ciò significa che il software riconosce bene gli ingressi dell'aria e ne rappresenta correttamente il funzionamento

2. Generazione dei moti convettivi naturali, del `CBL` (*Convective Boundary Layer*) e della *Thermal Plume*. Questi ultimi due termini hanno un significato simile ovvero indicano quello strato immediatamente in prossimità del manichino termico dove l'aria è riscaldata dallo scambio di energia con lo stesso e per ciò assume un moto verticale verso l'alto. Questo effetto non sarà centrale nella diffusione delle droplets in quanto viene rotto da una velocità molto piccola

($v \geq 0.2m/s$ [59]), ma la sua realizzazione dà fiducia ai risultati e alla buona costruzione della simulazione

Una volta confermata l'esistenza di questi due elementi si è assunto per buona la distribuzione delle velocità dell'aria e si è passati all'inserimento della fase lagrangiana in ambiente. È quindi chiaro come i 60 secondi sono stati frutto di numerose prove e valutazioni. Una seconda rappresentazione della velocità in ambiente potrebbe essere data dall'oggetto chiamato in `STAR-CCM+` *streamlines*. Questa indica in maniera più dettagliata la direzionalità dei flussi e può ritornare utile, più che apprende la distribuzione, per delineare i percorsi che le particelle possono percorrere in caso di "cattura" e re-immissione da parte del terminale. In secundis il raggiungimento della temperatura di equilibrio è invece indice di una durata della simulazione sufficiente a garantire l'equilibrio non solo dinamico, ma anche termico. È chiaro che la presenza di zone localizzate più calde o fredde potrebbe influire sul moto delle particelle. Come si leggerà dal grafico in figura 7.4, questo avviene dopo circa dieci minuti, in corrispondenza del lungo *plateau* e dunque non influisce le modalità e le tempistiche di *settling* delle particelle in aria. L'immissione di aria calda ($35°C$) per mezzo del respiro non ha nessuna influenza sensibile sulla temperatura media della stanza

## 7.2 Distribuzione del rischio di contagio

Nell'articolo proposto da Vuorinen et al. [60] viene indicata una formula estremamente interessante per la determinazione delle zone di una stanza più a rischio di contagio. Si introduce infatti il parametro

$$N_{acc}(\mathbf{x}, t) = \dot{V}_b \int_0^t c(\mathbf{x}, \tau) d\tau \tag{7.1}$$

dove:

- $N_{acc}$ è il numero di particelle cumulative che passano in un determinato volume di riferimento e verrebbero, conseguentemente inalate da un suscettibile posto all'interno dello stesso. Questo valore è strettamente legato al rischio di contagio e alla sua distribuzione spaziale e temporale. Sarà inoltre anche il risultato finale delle operazioni di *post-processing*. Può essere ricollegato ad una percentuale reale di probabilità di infezione, ma anch'esso è rappresentativo delle zone più o meno pericolose all'interno di una stanza
- $\dot{V}_b$ è il tasso di inalazione di particelle in aria. È legato al termine $\eta_a$ presentato nella sottosezione 5.2.3. Questo è posto pari a: $\dot{V}_b = 0.33 dm^3 s^{-1}$
- Il termine dentro l'integrale $c(\mathbf{x}, \tau)$ è la concentrazione di particelle locale in un determinato punto dello spazio per un volume di riferimento. Questa è chiaramente calcolata come $c = n_p / V_{rif}$ con $n_p$ numero di particelle

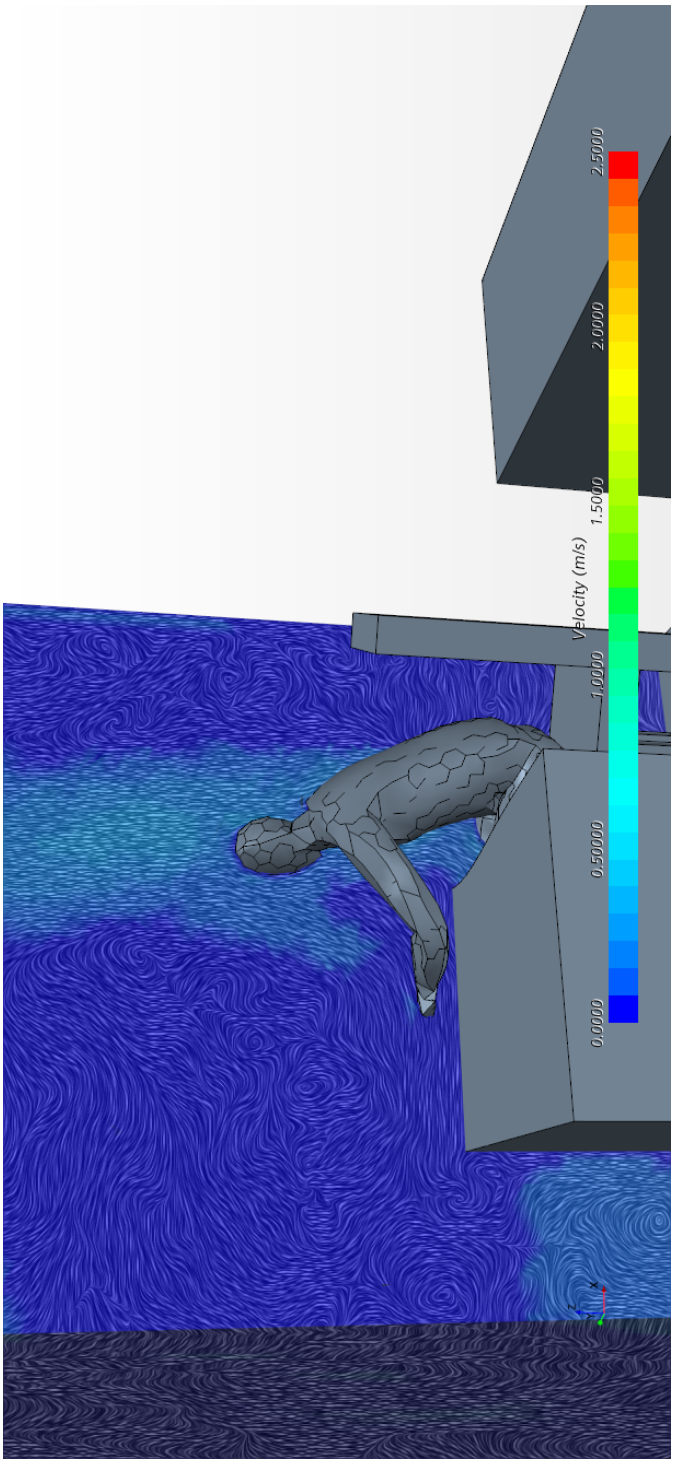



Figura 7.1: Formazione della *Thermal/Velocity Plume*

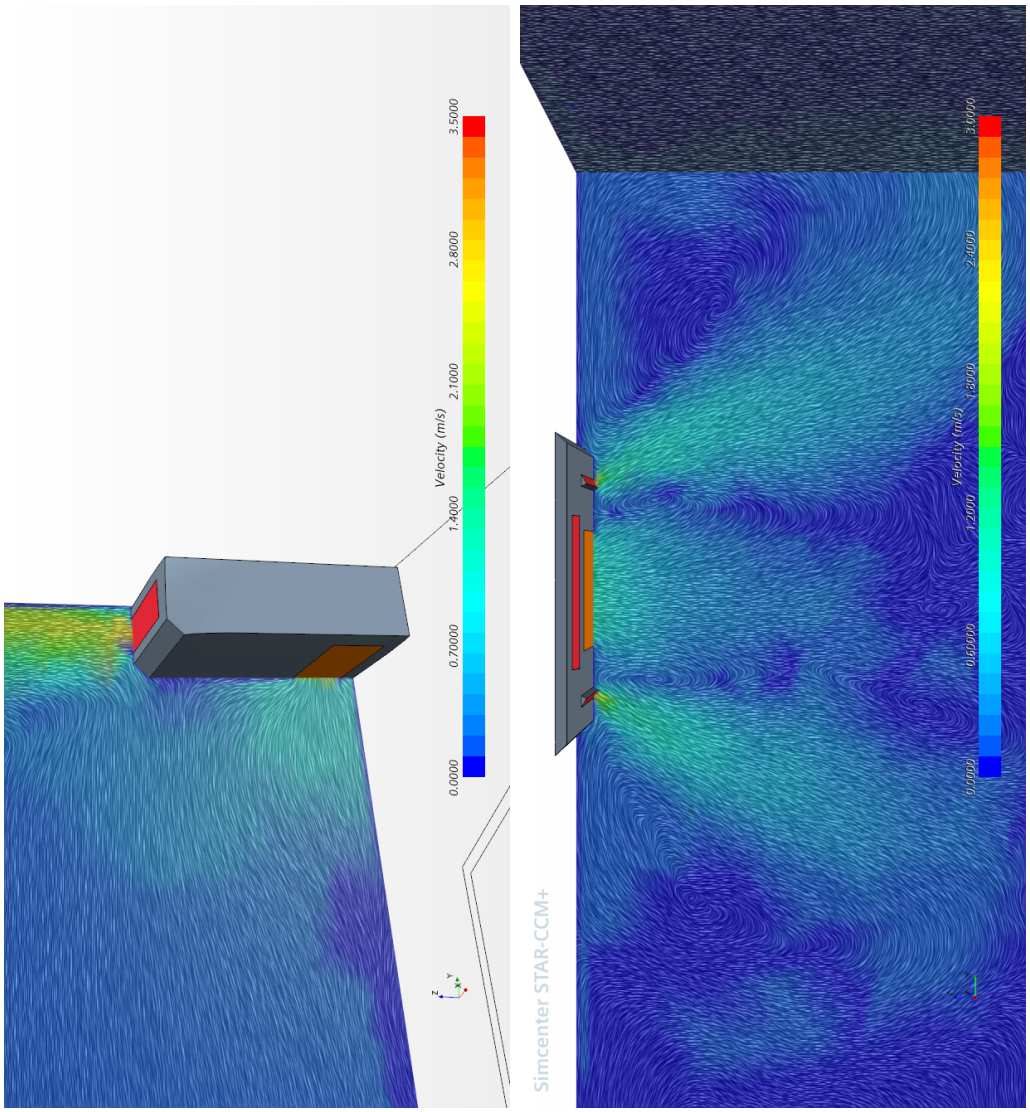



Figura 7.2: Dettaglio velocità terminali in ambiente

Come si vede la dipendenza dallo spazio di $c(\mathbf{x}, t)$ si ripercuote direttamente sulla grandezza risultante $N_{acc}(\mathbf{x}, t)$, mentre la componente temporale è estremo di integrazione. La conseguenza è che la concentrazione viene *"cumulata"* nel tempo e il rischio viene reso dipendente anche dal periodo di permanenza delle particelle nel volume (e dunque fortemente stretto a velocità e direzionalità del moto d'aria in quella zona). Il $V_{rif}$ scelto per la considerazione di entrambi i termini è una sfera di raggio $r = 0.62m$. Questo in quanto il suo valore così ottenuto è $V_{rif} \approx 1m^3$ e nel calcolo della concentrazione il termine a denominatore si semplifica.

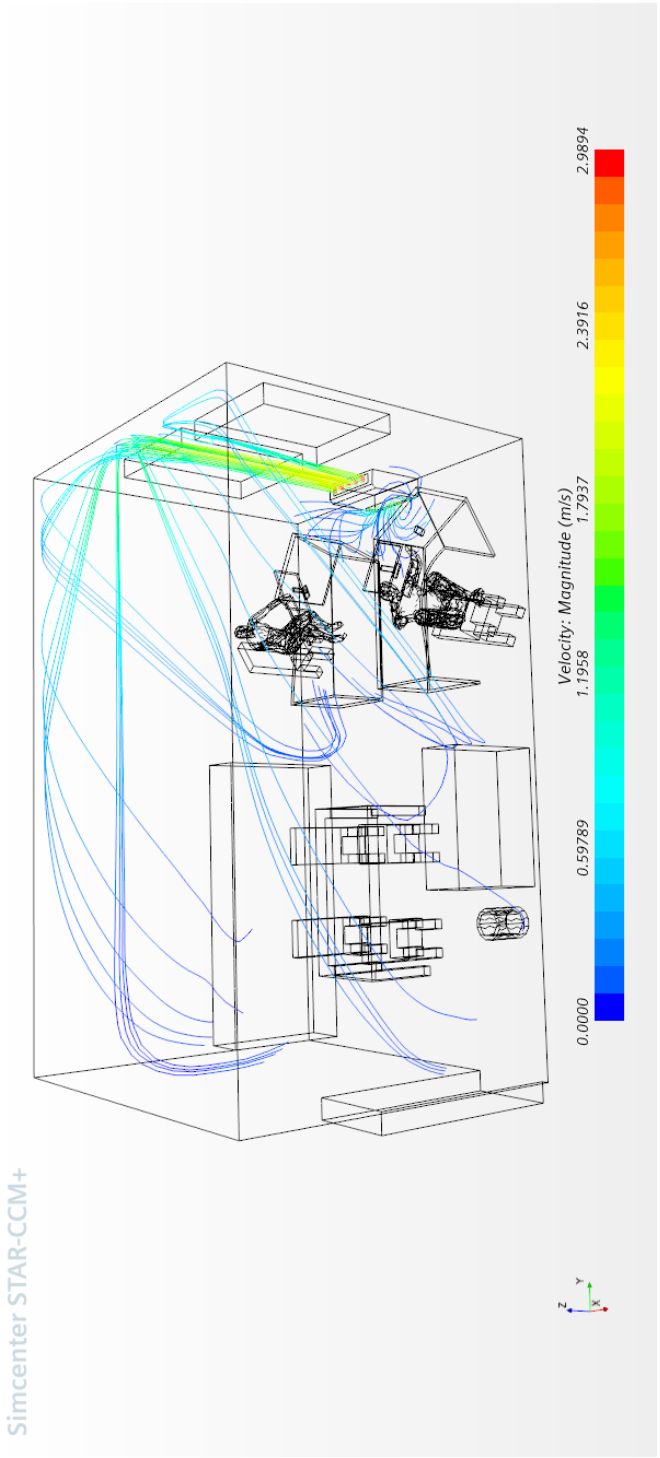



Figura 7.3: *Streamlines* per il caso con Fan Coil

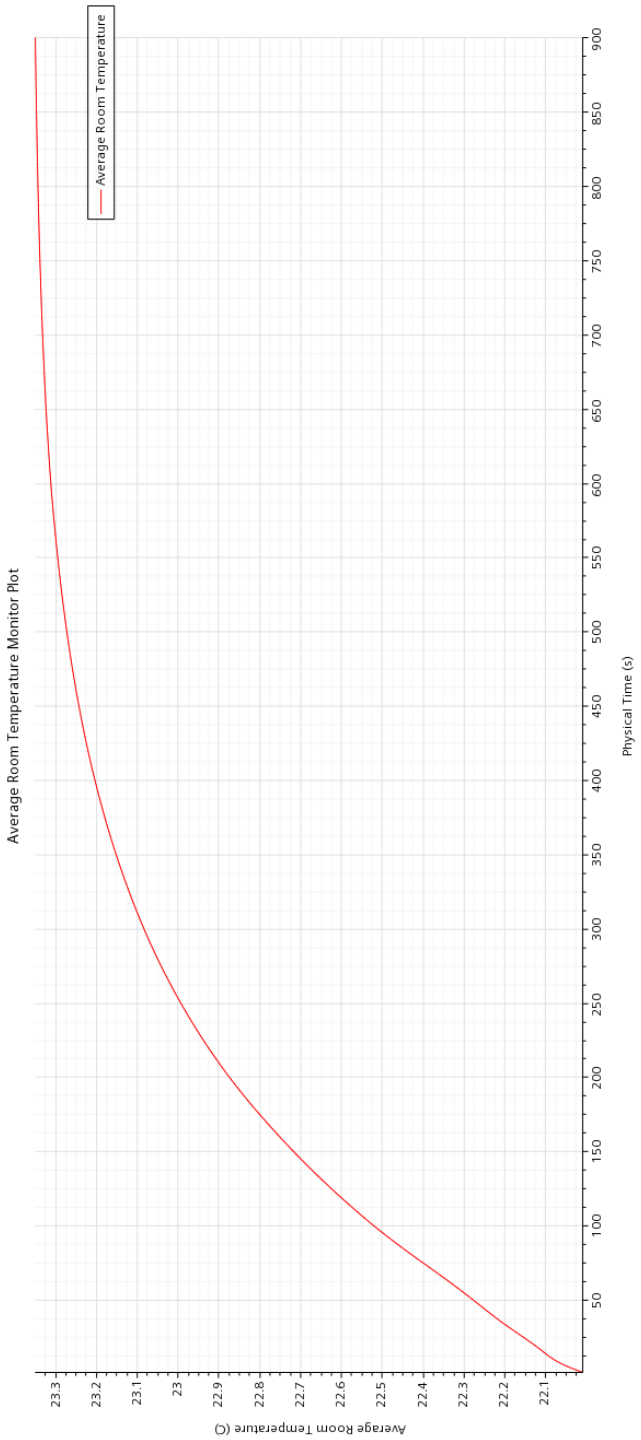



Figura 7.4: Temperatura media della stanza al variare del tempo

### 7.2.1 Procedura pratica: STAR-CCM+

Il calcolo di una quantità come $N_{acc}$ dell'equazione 7.1 prevede diversi *step* sia in `STAR-CCM+` che con software esterni. Verranno infatti utilizzati strumenti come fogli di calcolo e codice `MatLab`®.

1. Il primo passo consiste nel creare degli oggetti di tipo *probes* (come già proposti nello studio di indipendenza della mesh) che caratterizzano i volumi di riferimento più importanti all'interno dell'ambiente. Il calcolo della concentrazione viene infatti effettuato in maniera discreta con un'attenzione più rigorosa ad alcune zone. In figura 7.5 vengono rappresentati le posizioni di questi oggetti. I punti da 1 a 10 si preoccupano di monitorare la zona a sinistra, col tavolo delle riunioni e le due librerie. I punti dal 11 a 17 analizzano la situazione intorno al tavolo dell'infetto e quelli da 18 a 24 attorno alla scrivania del suscettibile. Sono salvati in un foglio di calcolo tutti i dati relativi a questi punti come il loro `ID` e le coordinate spaziali. L'intero calcolo è effettuato ad un altezza $h = 1.2m$ ovvero quella a cui è più plausibile che una persona seduta possa avere la propria bocca. Questo passo evince una problematica più complessa ovvero il calcolo della concentrazione distribuita su un piano, che può essere effettuato solo tramite l'introduzione di codice esterno in `STAR-CCM+`. La scelta di questa alternativa più semplice ha ridotto sostanzialmente la difficoltà incontrata nel determinare la grandezza localmente, riducendo di fatto in maniera seconda la qualità del risultato che focalizza comunque i punti di massimo rischio in ambiente.

2. Segue la definizione di *Filter Functions*. Queste sono piccole righe di codice che indicano al software di costruire un filtro a seconda del rispetto o meno di certe condizioni. Si è definita una funzione per ogni punto tramite l'utilizzo dell'equazione della sfera:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2$$

   Per uno dei punti si può leggere:

```
sqrt((pow($$Position[0]-1.1, 2)+pow($$Position[1]-1.3,
2)+pow($$Position[2]-1.2, 2)))<0.62 &&
abs($$ParticleVelocity[2])>0 ?1:0
```

   Dal codice nella *box* sopra si evince come le funzioni ritornino uno scalare pari all'unità laddove la posizione della particella rientra dentro la sfera di raggio $0.62m$ e centro in $C(1.1, 1.3, 1.2)$ (valori sostituiti a $x_c, y_c$ e $z_c$ nell'equazione della sfera) e la cui componente di velocità verticale (il termine `abs($$ParticleVelocity[2])` è proprio la velocità lungo la direzione $z$ presa in valore assoluto) non sia nulla, zero altrimenti. La prima delle due condizioni è chiara, la seconda invece è rispettata solamente per i corpi ancora in

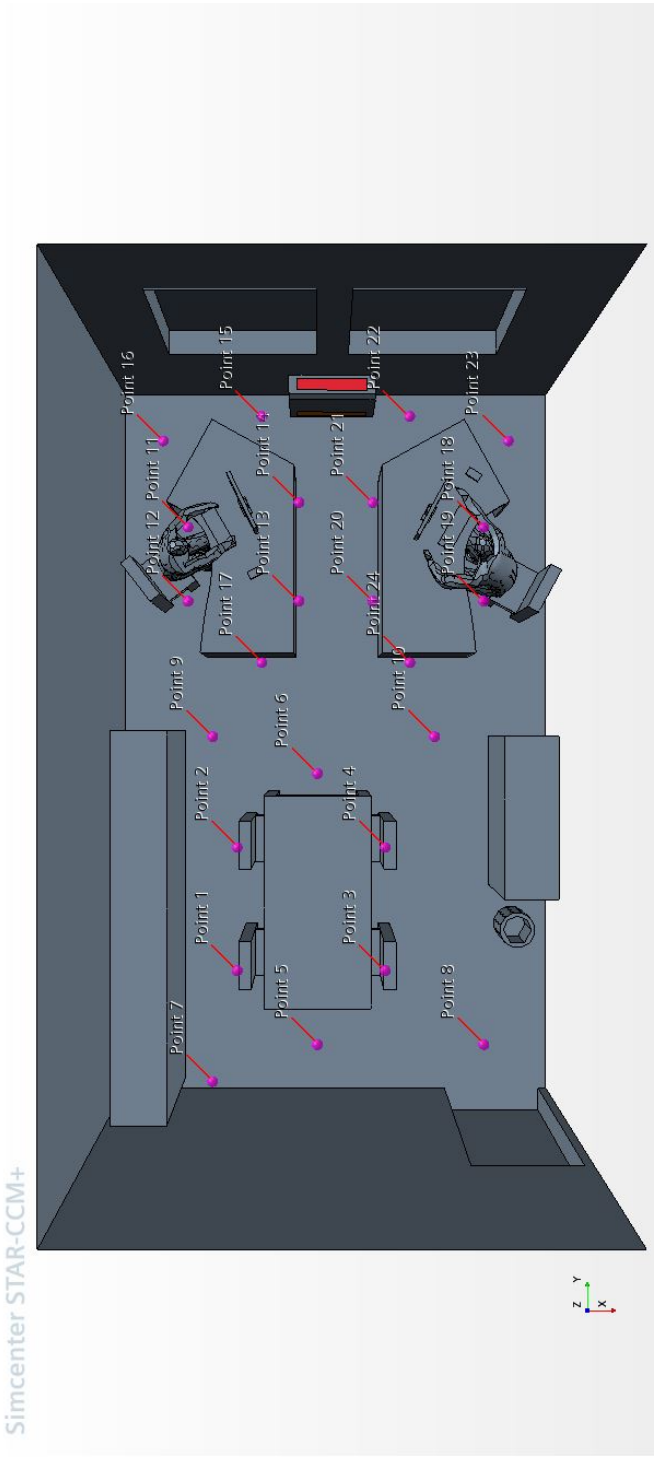



Figura 7.5: *Probe Points* per il calcolo della concentrazione

sospensione in aria. Infatti se la particella dovesse essersi depositata su qualche superficie questa avrebbe tutte le componenti di velocità nulle e deve essere tassativamente esclusa dal calcolo. La loro inclusione invaliderebbe fortemente i risultati rendendo molto pericolose zone in cui le droplets si sono depositate su superfici rispetto alle altre in sospensione. Il vettore `$$Position` contiene al suo interno le informazioni sui centroidi dei *parcels* immessi in ambiente.

3. Ad ogni *Field Function* così costruita è associata una *Threshold*. L'oggetto in questione caratterizza un insieme di input a seconda del valore ritornato da una funzione. In questo modo vengono identificate per ogni *Probe* le *droplets* che rientrano nel volume di riferimento ad essa circostante. Poiché la *Field Function* ritorna l'unità per il rispetto delle condizioni la *Threshold* si preoccupa di includere tutti i *Parcels* per cui si ha un valore $ff_{pr,pa} \geq 0.5$ dove con il termine a sinistra del segno di disuguaglianza si indica il valore della *Field Function* per ogni *Probe* e *Parcel*.

4. L'ultimo passo prevede la costruzione degli *Element Count Report*, con associati *Monitor* e *Plot*. In `STAR-CCM+` è possibile dire al software di monitorare una grandezza nel tempo. Questa può assumere valore di temperatura (figura 7.4), di velocità (figura 6.11), ma anche di altre grandezze più specifiche. Nel caso in questione verranno infatti contate le particelle di un oggetto di tipo *Threshold* come definito al punto precedente. Con tale operazione si può indicare chiaramente il numero di parcels che attraversano ogni zona e il loro tempo di permanenza nella stessa. La scelta oculata del volume di riferimento gioca ora un ruolo molto importante per cui, come già indicato, $c = n_p \Leftrightarrow V_{rif} = 1m^3$. Avendo rispettato la condizione necessaria e sufficiente si ha che viene riportato direttamente il valore di concentrazione (seppur considerato in *parcels*). Questo accorgimento rimuove il calcolo di $c$ e ci presenta direttamente la situazione finale. Il grafico in figura 7.6 racchiude la totalità delle ventiquattro probes in unica rappresentazione. La distinzione più chiara verrà effettuata in seguito su un foglio di calcolo.

### 7.2.2 Procedura pratica: Excel e MatLab

Il grafico riportato in figura 7.6 è l'ultimo oggetto prodotto in `STAR-CCM+` di questa prima parte di *post-processing*. Infatti questo viene esportato come file `.csv` e riaperto per mezzo di un foglio di calcolo. Il software Excel di Microsoft apre file di questo tipo e opera anche un'ottima riorganizzazione delle colonne per cui si è scelto di lavorare con questo. I valori vengono quindi riposti in colonne e si procede.

5. Ogni valore è moltiplicato per 70. Questa operazione è effettuata a valle di uno studio delle concentrazioni esalate. Ogni parcel così costruito contiene infatti all'incirca tale quantità di goccioline (cfr.6.4). Questo numero può

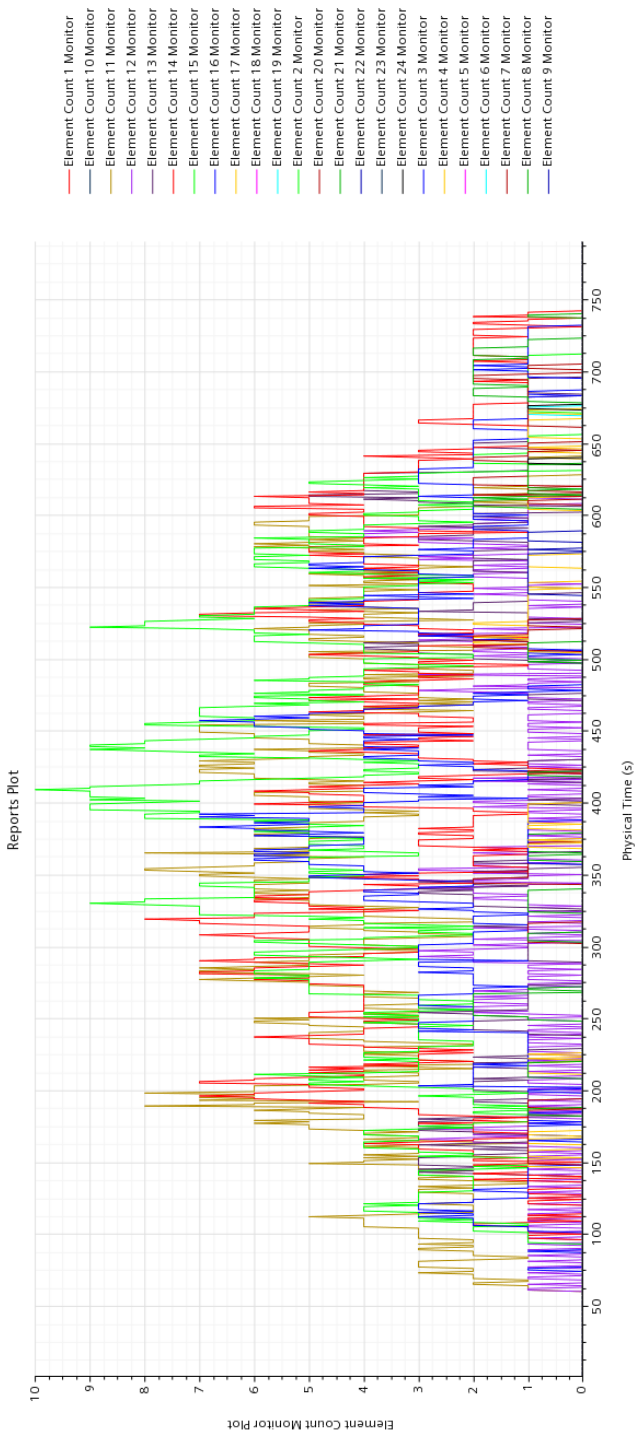



Figura 7.6: *Element Count Report Monitor Plot* per il calcolo della concentrazione

essere confutato da alcuni articoli (ad esempio [63]), ma è risultato conforme ad altri e genera dei risultati verosimili.

6. L'integrazione numerica non può essere effettuata sul continuo. La formulazione così come presentata in equazione 7.1 è quindi inutilizzabile e deve necessariamente essere discretizzata. Nello specifico:

$$N_{acc,pr} = \dot{V}_b n_{pa} \sum_{i=0}^{d_t(t)} c(\mathbf{x}_{pr}, t_i) \Delta t_i \tag{7.2}$$

dove:

- $N_{acc,pr}$ è il parametro già letto in equazione 7.1 relativo ad una specifica *probe pr*
- $n_{pa}$ è il numero di particelle per parcel già identificato come $n_{pa} = 70$
- L'integrale è sostituito da una sommatoria tra $i = 0$ e $d_t(t)$ che indica lo step temporale massimo discretizzato. Questa complicazione è in realtà futile in questo studio in quanto il tempo è scandito di secondo in secondo. Difatti:
$$d_t(t) = t/\Delta t$$
- $c(\mathbf{x}_{pr}, t_i)$ indica la concentrazione al tempo $t_i$ della probe posta in $\mathbf{x}_{pr}$
- $\Delta t_i$ indica il passo temporale $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$

Grazie a questa formulazione discreta è possibile integrare sul foglio di calcolo. Dalla figura 7.7 è già chiara la situazione di concentrazione di rischio in una zona molto ristretta. Le *Probes* più coinvolte sono infatti, in entrambi i casi, quelle dalla 11 alla 17 proprio in corrispondenza del tavolo dell'infetto. Molti valori nulli indicano invece che nessun parcel ha raggiunto quelle zone. La ventilazione meccanica forzata impone infatti, come si vedrà meglio nella prossima sezione, dei moti ben precisi alle particelle sospese che vengono dunque indirizzate in determinate aree rispetto ad altre

7. Prima di produrre un risultato omogeneo è però necessaria un'interpolazione sullo spazio. Infatti sono ora noti i valori di $N_{acc}$ solo in determinati punti e questi possono essere utilizzati per ottenere un risultato completo sull'intero piano. Esistono molti algoritmi che permettono di omogeneizzare una grandezza per mezzo di interpolazione e in questo studio si è optato per uno di questi denominato `IDW`, acronimo per *Inverse Distance Weighting*. Come si può evincere dal nome in inglese, il modello ottiene il valore ricercato per mezzo di ogni punto noto in funzione della distanza relativa. In formule:

$$y(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{j=1}^{n} y(\mathbf{x}_j) w_j}{\sum_{j=1}^{n} w_j}$$

dove:

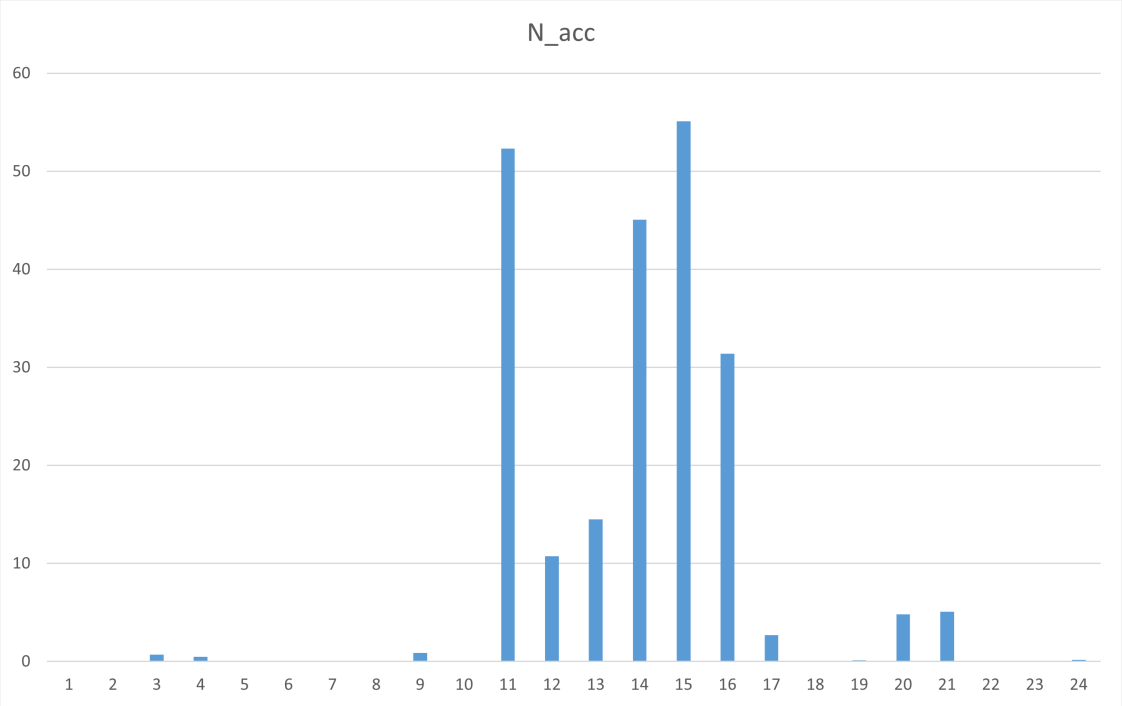



Figura 7.7: Valore di $N_{acc}$ calcolato per le ventiquattro *Probes*

- Il termine a sinistra dell'uguale $y(\mathbf{x})$ è il valore ricercato in ogni punto del piano
- Le sommatorie spaziano su $j = 1$ fino ad $n$, dove con $n$ si intende il numero di punti noti. In questo caso $n = 24$
- $y(\mathbf{x}_j)$ rappresenta il valore della grandezza nota nel punto j-esimo
- Il termine $w_j$ è invece una funzione inversa della distanza. Una volta definito $d_j(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j\|$ è possibile attribuire a $w_j = d_j^{-k}$ dove $k \in \mathbb{N}_0^+$, ovvero è un numero intero strettamente positivo. Al variare di questo parametro si modifica la dipendenza della funzione dalla distanza. Per questo studio si è imposto $k = 2$. Qualora $k$ crescesse la distribuzione si farebbe più "spigolosa" con picchi e valli più stretti e definiti

È stata prodotta una tabella che contenesse le informazioni riguardo i punti noti e il valore di $N_{acc}$, come proposta in figura 7.8 e che potesse essere letta da MatLab. È stato quindi stilato un piccolo script che genera una griglia di punti nello spazio a $\Delta x = 0.1m$ e $\Delta y = 0.1m$ e calcola il valore di $N_{acc}$ in ognuno di questi secondo le modalità descritte. Una volta operata l'interpolazione MatLab può produrre delle *heatmap* che rappresentano in maniera semplice la griglia prodotta e la soluzione calcolata, come in figura 7.9. Questa

| ID | x | y | z | N_acc |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,1 | 1,3 | 1,2 | 0 |
| 2 | 1,1 | 2,3 | 1,2 | 0 |
| 3 | 2,3 | 1,3 | 1,2 | 0,693 |
| 4 | 2,3 | 2,3 | 1,2 | 0,4851 |
| 5 | 1,75 | 0,7 | 1,2 | 0 |
| 6 | 1,75 | 2,9 | 1,2 | 0 |
| 7 | 0,9 | 0,4 | 1,2 | 0 |
| 8 | 3,1 | 0,7 | 1,2 | 0 |
| 9 | 0,9 | 3,2 | 1,2 | 0,8547 |
| 10 | 2,7 | 3,2 | 1,2 | 0 |
| 11 | 0,7 | 4,9 | 1,2 | 52,3215 |
| 12 | 0,7 | 4,3 | 1,2 | 10,7184 |
| 13 | 1,6 | 4,3 | 1,2 | 14,5068 |
| 14 | 1,6 | 5,1 | 1,2 | 45,045 |
| 15 | 1,3 | 5,8 | 1,2 | 55,0935 |
| 16 | 0,5 | 5,6 | 1,2 | 31,416 |
| 17 | 1,3 | 3,8 | 1,2 | 2,7027 |
| 18 | 3,1 | 4,9 | 1,2 | 0 |
| 19 | 3,1 | 4,3 | 1,2 | 0,1386 |
| 20 | 2,2 | 4,3 | 1,2 | 4,8048 |
| 21 | 2,2 | 5,1 | 1,2 | 5,0589 |
| 22 | 2,5 | 5,8 | 1,2 | 0 |
| 23 | 3,3 | 5,6 | 1,2 | 0 |
| 24 | 2,5 | 3,8 | 1,2 | 0,1617 |

Figura 7.8: Tabella per l'implementazione dell'algoritmo di interpolazione `IDW`

raffigurazione include a tutti gli effetti il risultato finale della simulazione, ma è scollegata dalla geometria e deve dunque essere re-importata su `STAR-CCM+`

### 7.2.3 Procedura pratica: produzione dei risultati

Dopo aver costruito la heatmap su Matlab ed essere qunidi in possesso di tutti i valori di $N_{acc}$ sul piano scelto ad $h = 1.2m$ è possibile importarli sotto forma tabella di nuovo su `STAR-CCM+`. Il formato accettato è, come già detto in precedenza, il `.csv` che Excel sa gestire. La *Field Function* utilizzata per inserire i valori nella geometria è descritta:

```
interpolatePositionTable(@Table("N_accTable"), "N_acc")
```

La speciale funzione `interpolatePositionTable` è utilizzata solo ora alla luce del fatto che la tipologia di interpolazione operata è di tipo *closest neighbor*. Questa associa ad ogni punto dello spazio un valore pari a quello del punto noto più vicino:

$$y(\mathbf{x}) = y(\mathbf{x}_j) \; : \; d_j < d_i \, \forall \, i$$

È chiaro come questa non sarebbe potuta andare bene per un set di punti rado come quello presentato in figura 7.5, ma può essere invece valida per una griglia molto

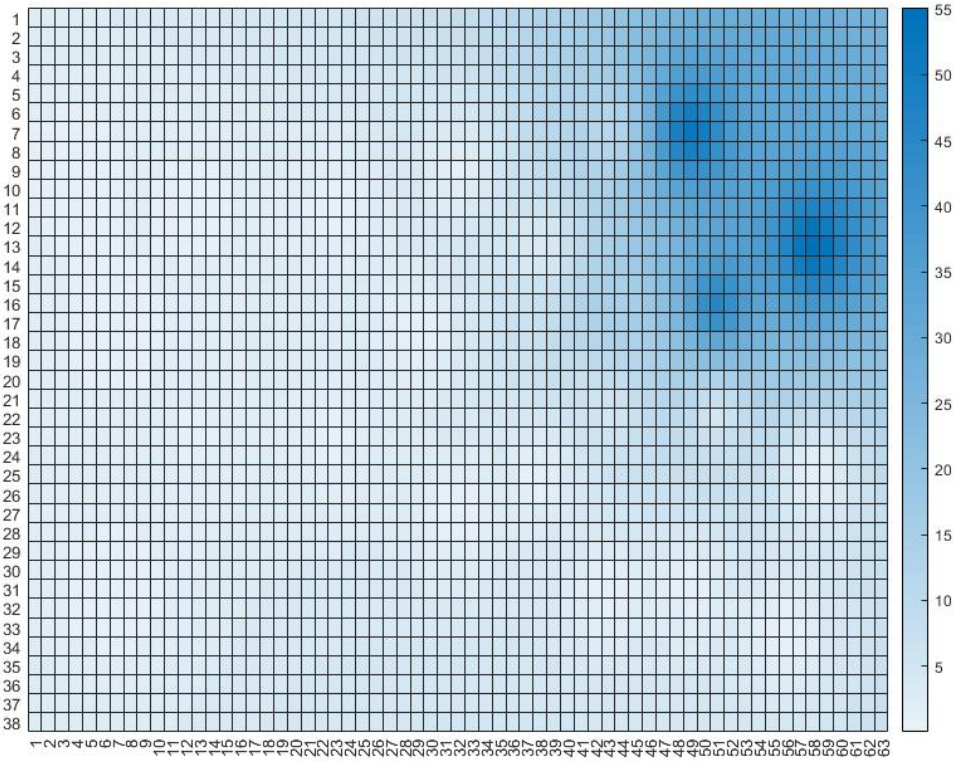



Figura 7.9: Soluzione per l'interpolazione come *heatmap* di Matlab

fine come in 7.9. La stessa viene quindi rappresentata su `STAR-CCM+`. Le figure 7.10 e 7.11 riportano il risultato di questa ultima operazione e saranno oggetto di analisi nella prossima sezione.

## 7.3 Analisi dei risultati

Dopo il post-processing si arriva all'ultima parte di una simulazione ovvero l'analisi e la comprensione dei risultati ottenuti. Le due figure 7.10 e 7.11 indicano una distribuzione plausibile di rischio di contagio di un soggetto posto in una posizione qualunque della stanza in presenza di un infetto per una durata di **10 minuti**. L'aumento di quest'ultima è sicuramente uno sviluppo futuro poiché la soluzione così ottenuta concentra, come già era possibile prevedere, il rischio in una zona ridotta nei pressi nell'injector di fase lagrangiana. Nonostante ciò è possibile effettuare alcune osservazioni critiche.

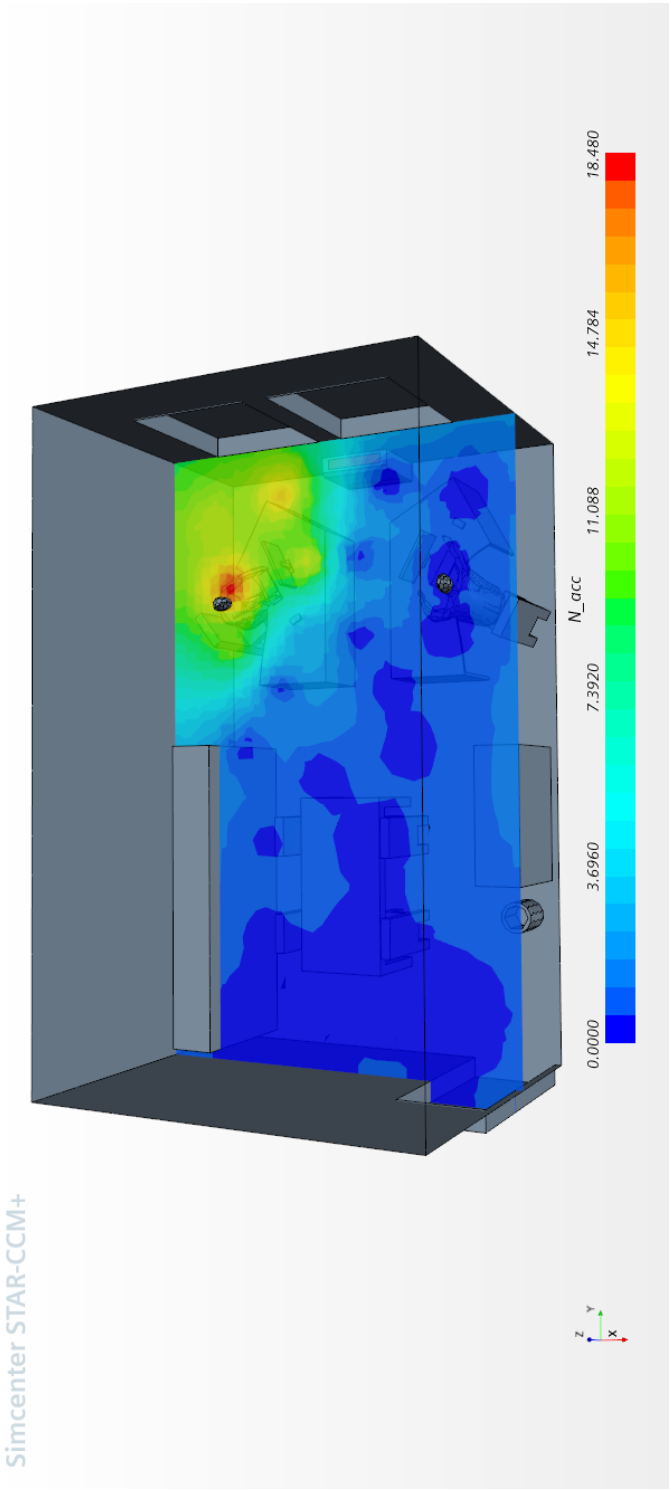



Figura 7.10: Distribuzione $N_{acc}$ per ventilazione con Fan Coil

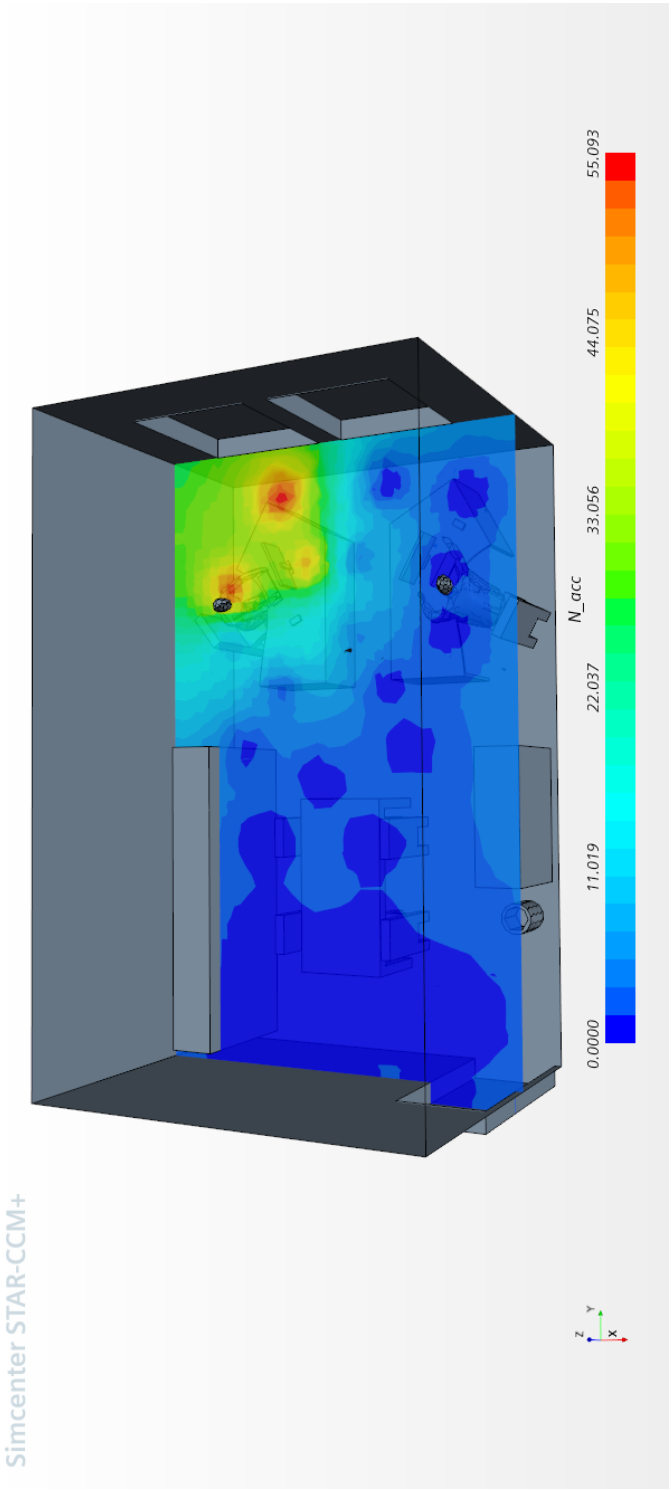



Figura 7.11: Distribuzione $N_{acc}$ per ventilazione con diffusore a soffitto

### 7.3.1 Velocità delle particelle

La prima cosa che salta all'occhio è sicuramente la forte differenza tra le scale nelle due figure. Infatti per quanto riguarda una ventilazione meccanica con diffusore il valore massimo di $N_{acc}$ è oltre il 50, mentre per quanto concerne la presenza di Fan Coil questo non supera i 20. Ciò è dovuto alla velocità media delle particelle in ambiente. In figura 7.12 vengono messe a confronto le due medie in funzione

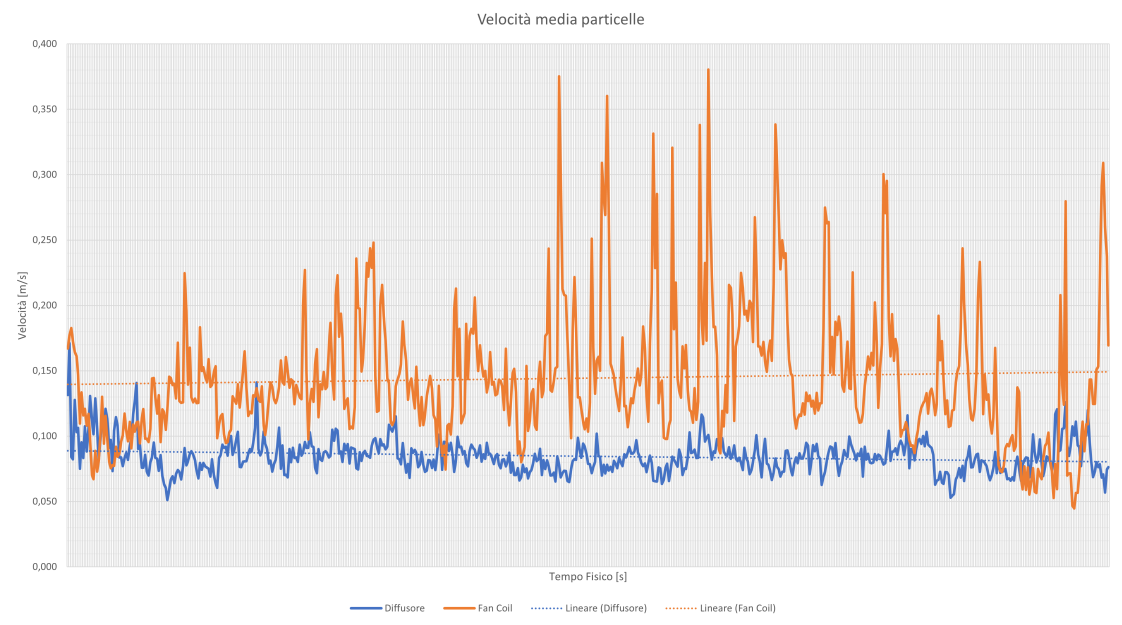



Figura 7.12: Grafico confronto velocità media perticelle

del tempo. In quasi ogni istante di tempo questa è maggiore nel caso del Fan Coil rispetto al diffusore con picchi anche di $v_{fc}/v_{diff} \approx 5$. In generale la velocità media nel primo caso è circa 1.75 volte quella del secondo caso e questa forte disuguaglianza spiega in prima linea i differenti valori ottenuti per le scale. Infatti le particelle vengono messe in moto dalla forte turbolenza nei pressi degli occupanti laddove il ventilconvettore sia effettivamente posto sotto le finestre e sparse rapidamente nell'ambiente e depositate sulle superfici. Questo fa sì che i tempi di permanenza nei vari volumi di riferimento siano minimi e il valore di $N_{acc}$ venga ridotto sostanzialmente. Se questo può sembrare un motivo a favore della ventilazione per mezzo di terminale sotto le finestre in realtà possono essere effettuate altre analisi che lo screditano.

### 7.3.2 Compartimentazione dei flussi

La compartimentazione dei flussi d'aria è una teoria molto seguita nella scelta dei terminali per la climatizzazione di un ambiente. Poiché questi sono stati posti nell'ufficio in maniera molto arbitraria la loro posizione e tipologia può essere d'aiuto, come d'intralcio nella limitazione della diffusione di contagio. Nella sottosezione precedente si indicava come il valore di $N_{acc}$ sia minimo nel caso di termoventilconvettore poiché le particelle vengono mosse più rapidamente. Questo non solo è tendenzialmente legato ad un maggior discomort termico degli occupanti (della scelta poco oculata del posizionamento del terminale se ne era già parlato in 6.1), ma può inoltre avere degli effetti negativi per il dislocamento delle stesse. Con le figure 7.13 e 7.14 si rappresenta questo problema. Il Fan Coil sì accelera le particelle e le tiene meno nei volumetti, ma ha anche l'effetto collaterale di raccoglierle e di spargerle diffusamente nell'ambiente. Questo non è un problema nei primi dieci minuti simulati, ma potrebbe risultare in un forte aumento del valore di $N_{acc}$ nella zona del tavolo delle riunioni, col procedere dell'immissione di fase lagrangiana. La compartimentazione avviene dunque lungo la direzione perpendicolare al muro con le finestre risultando in un rischio aumentato per chi si siede al tavolo centrale o per chi consulti materiale davanti ai mobili. Allo stesso tempo questa è invece indice di una totale assenza di rischio per il suscettibile seduto alla scrivania come da geometria. Questa zona è sicuramente protetta da una ventilazione meccanica controllata di questa tipologia. Il caso opposto si ottiene per mezzo del diffusore a soffitto, che non ha velocità tali da raggiungere efficacemente la zona occupata. Questo ha l'effetto di una pessima efficienza di lavaggio e di una permanenza di cariche nelle vicinanze dell'infetto e di una diffusione unicamente legata alla turbolenza. È quindi questa la modalità che più compromette la salute del secondo occupante. La compartimentazione è effettuata in questo caso più tra zona scrivanie e zona riunione: le cariche infatti vengono risucchiate dalla ripresa e difficilmente riescono a raggiungere la mobilia e l'area d'ingresso dell'ufficio. Con una durata maggiore si prevede dunque un aumento localizzato ancora più forte del parametro $N_{acc}$, ma una sua diffusione generale nella stanza limitata rispetto al caso precedente. Nella simulazione semplificata in analisi non è neppure previsto il ricircolo di carica virale che, in ingresso dalla ripresa è, specie nel caso del ventilconvettore, re-immessa ad elevate velocità in ambiente. Per tutte queste problematiche sulla gestione degli impianti a ricircolo locale si fa riferimento alla prima parte della tesi (sezione 2.5.2)

### 7.3.3 Rischio di contagio effettivo

L'intero studio si è basato sul parametro definito dall'equazione 7.1, che rappresenta in maniera **qualitativa** la distribuzione di concentrazioni di cariche infettive in un ambiente. Il legame che però lo tiene al rischio di contagio così come calcolato nel capitolo 4 è ancora in fase di sviluppo. Infatti si è voluto virare verso una soluzione più rappresentativa della probabilità, che quantitativa del rischio che può essere

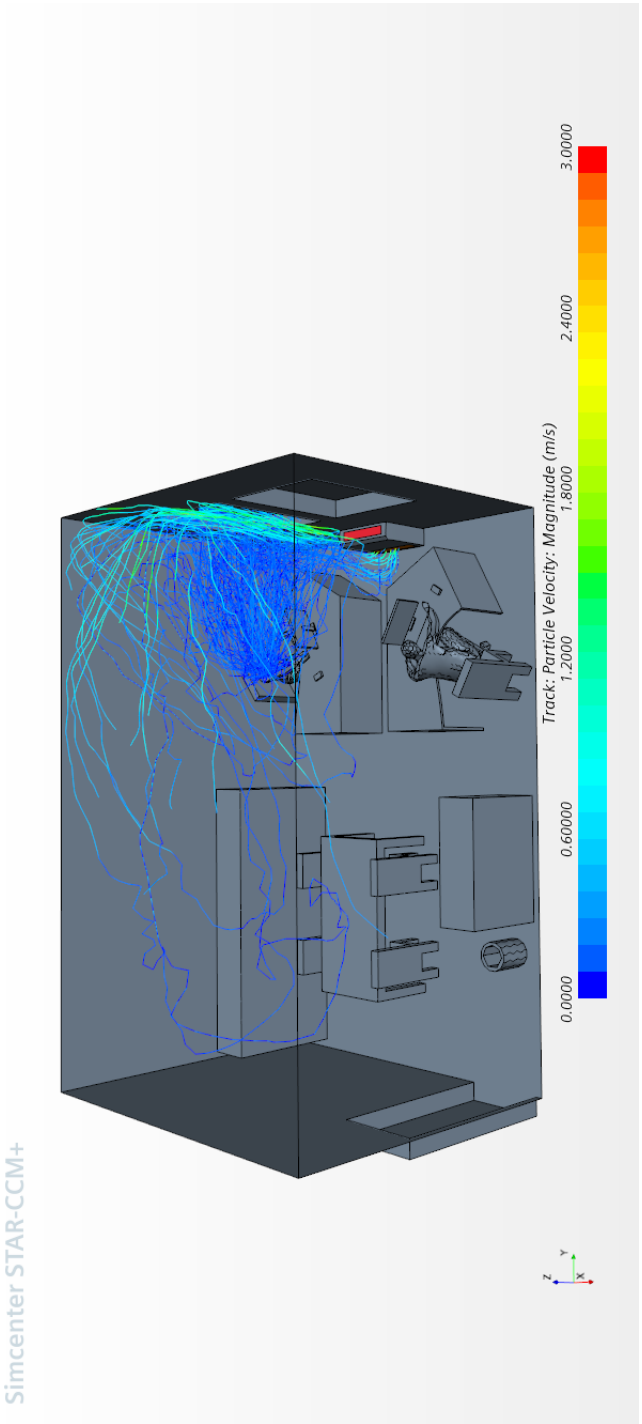



Figura 7.13: *Streamlines* per la velocità e direzione particelle con ventilazione per Fan Coil

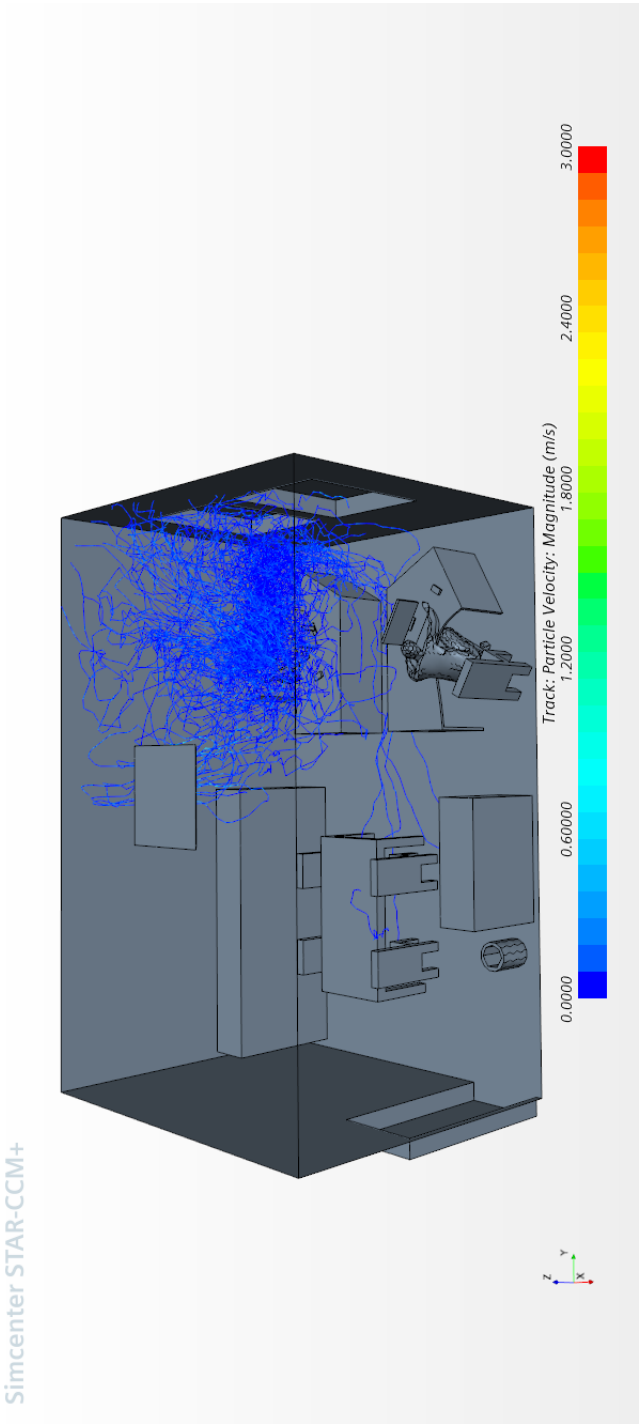



Figura 7.14: *Streamlines* per la velocità e direzione particelle con ventilazione per diffusore a soffitto

funzione di un'infinità di parametri. Non c'è alcun dubbio che esista una

$$f(N_{acc}) = P_{infection}$$

ma questa dovrà essere validata da studi sperimentali più specifici e accorti. Ad oggi è stata presentata la possibilità di definire un $N_{b,cr}$ ovvero un valore tale da generare delle *zone macroscopiche di rischio* laddove $N_{acc} \geq N_{b,cr}$. Questa teoria può essere anche estesa a degli studi dove è inclusa anche la movimentazione delle persone in ambiente.

### 7.3.4 Commenti e conclusioni

Come facilmente deducibile dalle precedenti sottosezioni la ventilazione gioca un ruolo fondamentale nella distribuzione delle cariche virali in ambiente e di conseguenza nello studio del rischio di contagio e della diffusione della malattia. Se questo era indubbio sui grandi ambienti ora viene confermata ulteriormente anche la necessità di analisi specifiche per i locali più occupati di dimensioni più ridotte. La simulazione di grandi aule universitarie può costituire essa stessa una grande sfida per i progettisti e l'introduzione di nuove modalità di ventilazione o di dispositivi *in loco* deve essere oggetto di validazione fluidodinamica. Gli sviluppi futuri prevedono sicuramente un raffinamento delle geometrie e l'implementazione di casi reali (non arbitrari come in questo lavoro), oltre ad uno studio con numeri maggiorati rispetto al caso presentato (sia la quantità di *droplets* immesse, sia la durata fisica). Questi sono sicuramente da prendere in considerazione a valle di una maggiore potenza computazionale che richiede dunque l'utilizzo di calcolatori più performanti o di server dedicati e darebbe luogo a dei profili di distribuzione del rischio più specifici per ciascuna situazione di ventilazione installata. In ogni caso **il raggiungimento di una soluzione come quella riportata alla fine di questo lavoro dà adito a molte altre domande sorte durante lo sviluppo e dà fiducia alla possibilità di ottenere risultati concreti atti alla riduzione del rischio di contagio negli ambienti *indoor* per mezzo di software simulativi**.

# Bibliografia


[1] *M.E.Levison* - COVID-19: Cosa sappiamo sui coronavirus

[2] *B.L.Tesini* - Coronavirus e sindrome respiratoria acuta

[3] Rapporto ISS COVID-19 • n. 33/2020 - Indicazione sugli impianti di ventilazione/climatizzazione in strutture comunitarie non sanitarie e in ambienti docmestici in relazione alla diffusione del virus SARS-CoV-2

[4] REHVA COVID-19 Guidance document, March 17, 2020

[5] *L.Morawska* - Droplet fate in indoor enviroments, or can we prevent the spread of infection?

[6] *M.G.da Silva* - An analysis of the transmission modes of COVID-19 in light of the concepts of Indoor Air Quality

[7] Dcoumento ASHRAE - ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols, `April 14, 2020`

[8] Seminario AERMEC - *Intervento e slides dell'ing.* `Vio`: Importanza dell'immissione di aria esterna per limitare il contagio per via aerea

[9] *J.Wang et al.* - High temperature and high humidity reduce the transmission of COVID-19

[10] Humidity control events in perioperative care aeras - ASHRAE Protocol

[11] *G.Ficetola & D.Rubolini* - Climate Affect Global Pattern of COVID-19 Early Outbreak Dynamics

[12] *Ma et al.* - Effect of temperature variation and humidity on the death of COVID-19 in Wuhan, Cine

[13] *G.Thompson* - Climate-informed HVAC increases in relative humidity may fight pademic viruses

[14] Dal WEBINAR *Impianti tecnologici ad aria e propagazione di agenti patogeni: nuove criticità progettuali e gestionali*. Gli interventi di `Prof. A. Cossarizza`, `Prof. P. Tartarini` e `Ing. S. Biondini`

[15] *Setti et al.* - The potential role of Particulate Matter in the Spreading of COVID-19 in Northen Italy: First Evidence-based Reasearch Hypotehesis

[16] *Qu et al.* - An Imperative Need for Research on the Role of Enviromental Factors in Transmission of Novel Coronavirus (COVID-19)

[17] *E.Bontempi* - First data analysis about possible COVID-19 virus airborne diffusion due to air particulate matter (PM): The case of Lombardy (Italy)

[18] *Zhu et al.* - Association between short-term exposure to air pollutui and COVID-19 infection: evidence from China
[19] *IES Committee Report*: Germicidal Ultraviolet (GUV) - Frequently asked questions
[20] ASHRAE Epidemic Task Force - Filtration & Disinfection
[21] *Scientific Brief* - Transmission of SARS-CoV-2: implication for infection prevention precaustions
[22] *T.F.Booth et al.* - Detection of Airborne Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS) Coronavirus and Enviromental Contamination in SARS Outbreak Units
[23] *D.Lewis* - Is the coronavirus airborne? Experts can't agree
[24] Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19)
[25] Infection prevention and control during health care when COVID-19 is suspected
[26] *L.Morawska, J. Cao* - Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality
[27] *G.Correia et al.* - Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission
[28] Da *The New Engliand Journal of Medicine* - Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1
[29] *Correspondence* - How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?
[30] *Ministero della Salute, Istituto Superiore di Sanità* - Monitoraggio Fase 2
[31] COVID-19 Strategy Update del `14 Aprile 2020`
[32] Putting the UN framework for socio-economic response to COVID-19 into action: insights `di Giugno 2020`
[33] *McKinsey & Company* - COVID-19: Briefing materials. Global health and crisis response
[34] *Lu et al.* - COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020. Da `Emerging Infectious Diseases` • Vol. 26, No.7, July 2020
[35] *prof. F.D'Ambrosio, ing. M.Vio* - Il caso del ristorante di Guangzhou: Riflessioni sul ruolo degli impianti di climatizzazione e la diffusione della COVID 19
[36] Documento AICARR - Gli impianti e la diffusione del SARS-CoV-2 nei luoghi di lavoro
[37] Documento AICARR - Protocollo per la riduzione del rischio da diffusione del SARS-CoV2-19 mediante gli impianti di climatizzazione e ventilazione esistenti
[38] Documento AICARR - Posizione di AICARR sul funzionamento degli impianti di climatizzazione durante l'emergenza SARS-COV2-19
[39] Documento AICARR - Prontuario: Ruolo degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva nella riduzione della diffusione della COVID-19

[40] Documento AICARR - Protocollo per la riduzione del rischio da diffusione del SARS-CoV-2 nelle operazioni di gestione e manutenzione degli impianti di climatizzazione e ventilazione esistenti `Luglio 2020`

[41] Documento ASHRAE - Pandemic COVID-19 and Airborne Transmission

[42] Documento NIOSH - *Guidance for* Filtration and Air-Cleaning Systems to Protect Building Enviromentss

[43] Documento ASHRAE - ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning

[44] Documento ASHRAE - ASHRAE Epidemic Task Force: Filtration & Disinfection

[45] REHVA COVID-19 Guidance document, April 3, 2020

[46] REHVA COVID-19 Guidance document, August 3, 2020

[47] Documento BESA - Summary practical measures for building services operation

[48] Rapporto ISS COVID-19 • n. 5/2020 Rev. 2 - Indicazioni *ad interim* per la prevenzione e gestione degli ambienti *indoor* in relazione alla trasmissione dell'infezione da virus SARS-CoV-2

[49] Scheda tecnica Tecnoventil - Diffusori ad alta induzione S422

[50] *E.Nardell'* - Wells Revisited: Infectious Particles vs. Quanta of *Mycobacterium tubercolosis* Infection, Don't Get Them Confused

[51] *H.Dai, B.Zhao* - Association of infected probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces: a Wells-Riley equation based investigation

[52] NAFA Foundation Report - HVAC filtration and the Wells-Rile approach to assessing risks of infectious airborne diseases

[53] *G.Buonanno et al.* - Estination of airborne viral emission: quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment

[54] *L.Gammaitoni, M.C.Nucci* - Using a mathematical model to evaluate the efficacy of TB control measures

[55] Exposure Factor Handbook - *Chapter 6*, September 2011

[56] Highlight of the Chinese Exposure Factors Handbook (Adults)

[57] *D.S.Hui et al.* - Exhaled Air Dispersion during Coughing with and without Wearing a Surgical or N95 Mask

[58] *Morawska et al.* - Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human repiratory tract during expiratory activities

[59] *Z.T.Ai, A.K.Melikov* - Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor enviroments: A review

[60] *Vuorinen et al.* - Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulation in relation to SARS-CoV-2 trasmission by inhalation indoors

[61] *Balachandar et al.* - Host-to-Host Airborne Transmission As a Multiphase Flow Problem Fot Science-Based Distance Guidelines

[62] Simcenter STAR-CCM+ Documentation (Version 2020.2)

[63] *S.Shao et al.* - Risk assessment of airborne transmission of COVID-19 by asymptomatic individuals under different practical setting

# Sitografia

[64] http://opendatadpc.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/b0c68bce2cce478eaac82fe38d4138b1
[65] http://www.salute.gov.it/portale/nuovocoronavirus/archivioNotizieNuovoCoronavirus.jsp
[66] https://www.ashrae.org/technical-resources/building-readiness
[67] https://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer
[68] https://arwmisure.com/misura-della-portata-daria-ambienti-interni-balometro/