

ORDINE DEGLI INGEGNERI DI CATANIA

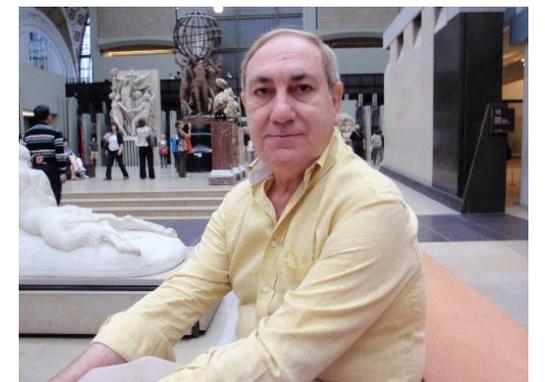
SEMINARIO DI APPROFONDIMENTO

GLI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE E LA COVID 19

MODULO A

***INTRODUZIONE ALLA PROBLEMATICHE DELLA COVID 19
TRASMISSIONE AEREA DEL VIRUS SARS-COV-2
CALCOLO DELLA PROBABILITÀ DI CONTAGIO***

Prof. Ing. Giuliano Cammarata



INTRODUZIONE AL SEMINARIO PARTE A

ORDINE DEGLI INGEGNERI DI CATANIA
SEMINARIO DI APPROFONDIMENTO
GLI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE E LA COVID 19

MODULO A – Vers. 1
INTRODUZIONE ALLA PROBLEMATICHE DEL COVID 19
TRASMISSIONE AEREA DEL VIRUS SARS-COV-2
CALCOLO DELLA PROBABILITÀ DI CONTAGIO

Prof. Ing. Giuliano Cammarata



1

INTRODUZIONE AL SEMINARIO PARTE A



2

LE PROBLEMATICHE DELLA COVID 19



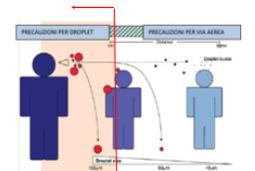
3

MECCANISMI DI TRASMISSIONE DELLA COVID 19



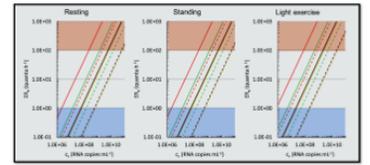
4

MECCANISMI DI TRASMISSIONE A BREVE DISTANZA



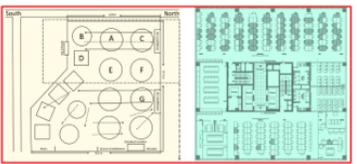
5

PRODUZIONE DEI «QUANTA» NEGLI EDIFICI



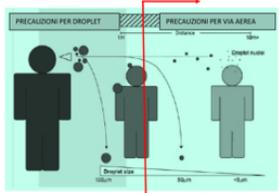
6

CASI CENSITI DI TRASMISSIONE DELLA COVID 19



7

MECCANISMI DI TRASMISSIONE A GRANDE DISTANZA



8

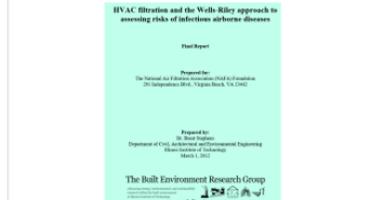
LETTERATURA SUI CONTAGI PER VIA AEREA

HVAC Filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases

Final Report

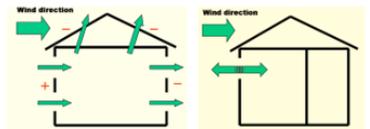
Prepared for:
The Federal Aviation Administration (FAA) by Lockheed Martin

Prepared by:
The Built Environment Research Group



9

LA VENTILAZIONE NATURALE



10

LA VENTILAZIONE FORZATA



11

LA VENTILAZIONE IN PRESENZA DI CONTAGIO
RELAZIONE DI CALCOLO DELLA PROBABILITÀ DI CONTAGIO

Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities

Recommendations of CDC and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC)



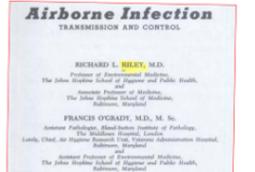
12

LA VENTILAZIONE IN PRESENZA DI CONTAGIO
RELAZIONE DI WALLS - RILEY

Airborne Infection TRANSMISSION AND CONTROL

RICHARD S. WALLS, M.D.
Professor of Environmental Medicine,
The Johns Hopkins School of Hygiene and Public Health,
The Johns Hopkins Hospital, Baltimore, Maryland

FRANCIS O'RYGAN, M.D., M.Sc.
Assistant Professor, School of Public Health,
The Johns Hopkins Hospital, Baltimore, Maryland



13

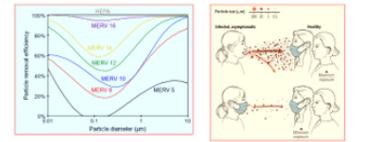
LA VENTILAZIONE IN PRESENZA DI CONTAGIO
RELAZIONE GAMMAITONI NUCCI

Luca Gammaitoni and Maria Clara Nucci
University of Perugia, Perugia, Italy



14

MODIFICHE DI FISK E NAZAROFF PER LE PROTEZIONI PASSIVE DEGLI IMPIANTI



15

RELAZIONE DI GAMMAITONI – NUCCI
CALCOLO IN CONDIZIONI NON STAZIONARIE

16

RIESAME DEL CASO DI TRASMISSIONE DI SARS-COV-2
NELLO «SKAGIT VALLEY CHORALE»
DETERMINAZIONE DELLA PRODUZIONE DEI QUANTA
CON IL METODO DI GAMMAITONI - NUCCI

17

SINTESI DELLE PROCEDURE DI CALCOLO DEL RISCHIO DI CONTAGIO PER VIA AEREA – PROGETTO E VERIFICA

$$P = \frac{C}{N} = \left(1 - e^{-\left(\frac{\lambda_{in} N_{in} t}{V} + \frac{\lambda_{air} N_{air} t}{V} \right)} \right) 100$$
$$P = \left(1 - e^{-\left(\frac{\lambda_{in} N_{in} t}{V} + \frac{\lambda_{air} N_{air} t}{V} \right)} \right) 100$$
$$\lambda_{in} = \left(\frac{Q_{in} - Q_{out}}{V} \right) \lambda_{in}$$
$$\lambda_{air} = \left(\frac{Q_{in} - Q_{out}}{V} \right) \lambda_{air}$$


18

CONFRONTO FRA I TRE METODI DI CALCOLO DELLA PROBABILITÀ DI CONTAGIO

19

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Prof. Ing. Giuliano Cammarata
Web: www.giulianocammarata.it



20

ORGANIZZAZIONE DEL SEMINARIO PARTE B

1	ORDINE DEGLI INGEGNERI DI CATANIA SEMINARIO DI APPROFONDIMENTO GLI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE E LA COVID 19 MODULO B CRITERI DI PROGETTO DEGLI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE PER LA COVID 19 Prof. Ing. Giuliano Cammarata 	2	INTRODUZIONE E MOTIVAZIONI	3	GLI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE	4	DISTRIBUZIONE DELL'ARIA MEDIANTE LA VENTILAZIONE MECCANICA	5	CONSIDERAZIONI SULLA VENTILAZIONE E LA TRASMISSIONE DEL VIRUS	6	CASI ESEMPIO DI APPLICAZIONE DELLE RELAZIONI PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA CONTAGIO VIRALE PER VIA AEREA
7	CASO ESEMPIO N. 1 UFFICIO OPENSACE DA 450 m ³	8	CASO ESEMPIO N. 2 SUPERMERCATO DA 1.200 m ³	9	CASO ESEMPIO N. 3 SCUOLA POLIFUNZIONALE ESISTENTE	10	NORME E DECRETI EMESSI IN MATERIA DI MISURE DI CONTENIMENTO DELLA COVID-19	11	ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ «MODALITÀ DI CONTAGIO INDOTTO DAGLI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE» 	12	PROPOSTE AICARR PER GLI IMPIANTI IN PRESENZA DI SARS-COV-2
13	DOCUMENTAZIONE ASHRAE PER LE MALATTIE INFETTIVE E POSITION PAPER	14	DOCUMENTAZIONE REHVA PER LE MALATTIE INFETTIVE E POSITION PAPER	15	LINEE DI INDIRIZZO PER ATTIVITÀ COMMERCIALI DPCM 15/05/2020	16	TIPOLOGIE DI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE	17	FILTRAZIONE DELL'ARIA	18	USO DELLE LAMPADE U.V. PER AMBIENTI
19	CONSIDERAZIONI FINALI SUI SISTEMI DI RIDUZIONE DEL CONTAGIO	20	LINEE GUIDA PER I TRASPORTI Sintesi Linee guida per l'informazione agli utenti e le modalità organizzative per il contenimento della diffusione di Covid-19 (All.9 DPCM 26 aprile - sintesi del MIT)	21	CONCLUSIONI	22	GRAZIE PER L'ATTENZIONE Prof. Ing. Giuliano Cammarata Web: www.giulianocammarata.it Mail: cammarata@ingcammarata.com 				

Introduzione al Seminario

L'umanità intera ha vissuto, e continua ancora a farlo, uno dei periodi peggiori della sua esistenza.

Ci sono state **cinque** estinzioni di massa in epoche geologiche lontane.

Oggi viviamo la **sesta** estinzione di massa per effetto delle azioni antropiche sul pianeta, eppure, la pandemia da **COVID 19** ha segnato, dalla fine di novembre **2019** ad ancora oggi, uno dei periodi più intensi e carico di avvenimenti da oltre un secolo a questa parte.

La **pandemia** sta causando oltre due decine di milioni di contagi e oltre un milione di morti, Ma non sono solamente queste cifre che fanno impressione.

E' la modalità del contagio e le azioni intraprese per il suo contenimento, il noto «**distanziamento interpersonale**», che hanno prodotto fenomeni sociali e perdite economiche mai viste nella storia dell'uomo in tempi di pace.

La necessità di rimanere distanziati (**almeno 1 m**), di evitare assembramenti, di utilizzare **DPI** (*mascherine, guanti*) ha di fatto bloccato le attività produttive e scolastiche.

Per mesi le scuole sono state chiuse, applicando la **DAD** (*Didattica a Distanza*). Ancora oggi si dibatte su come e se riaprirle con innumerevoli problemi amplificati dal numero di persone interessate, oltre **11 milioni** fra studenti e personale docente ed ausiliario.

Molti uffici e fabbriche utilizzano il **telelavoro** (detto *smart working*), le teleconferenze e tutti gli strumenti che hardware e software che oggi internet ci mette a disposizione.

Introduzione al seminario

Durante il **lockdown** moltissime attività artigianali e piccole imprese sono state fermate (*ristoranti, bar, alberghi, spiagge, palestre, negozi non di immediata necessità, libere professioni,*) e milioni di lavoratori sono rimasti inattivi, senza lavoro o con sussidi limitati e spesso incerti.

In queste condizioni l'economia italiana, come pure di tutte le nazioni interessate dalla pandemia, è retrocessa come mai dal dopo guerra, generando problemi immensi per la ripartenza. In un'economia di mercato la fermata per due – tre mesi delle attività produttive ha prodotto non solo la riduzione o l'annullamento del reddito ma anche la compromissione delle quote di mercati e la perdita di competitività.

Pur con l'inizio della cosiddetta **FASE 2** e **FASE 3** si hanno problemi a ritornare alla piena normalità produttiva e sociale. I focolai di **SARS-CoV-2** sono presenti ovunque.

Le conseguenze **psicologiche** della quarantena sono state evidenti: **milioni di persone hanno sofferto della «sindrome della capanna»**, non volevano uscire fuori casa per paura del contagio, non desideravano incontrare persone estranee, non volevano riprendere la vita normale precedente all'inizio della pandemia.

La prof.sa **Tognotti**, ordinaria di *Storia della medicina e della Sanità pubblica all'Università di Sassari*, così si è espressa:

«Non possiamo vivere in una quarantena perenne, circondati da un cordone sanitario di mascherine, guanti, gel, distanziamento, linee guida e ordinanze. Il livello di incertezza sul quando finirà tutto questo non ha precedenti»

Introduzione al seminario

Nelle settimane più critiche del **lockdown** abbiamo assistito giornalmente a numerosi interventi di **virologi** ed **epidemiologici** di chiara fama, ai vertici delle istituzioni mediche pubbliche nazionali e internazionali.

Purtroppo, non sempre si è avuta un'unità di veduta e anzi si è innescata una competizione fra **divi** che ha prodotto una maggiore confusione e scoraggiamento.

Si sono avuti virologi pessimisti, altri ottimisti, altri all'apparenza più realisti.

Non abbiamo mai avuto un riferimento certo sullo svolgimento della pandemia, sulle prospettive future di ripresa di una vita normale.

AGI >

La "guerra" tra virologi sconfinata in politica, ecco come il virus ha diviso l'Italia

La disputa sul Covid "più buono", lo stato d'emergenza opportuno o esagerato, le mascherine. La scienza si divide, ed è destra contro sinistra

Introduzione al seminario

Il virus è stato presentato inizialmente come una sorta di **super influenza** che non avrebbe dovuto preoccupare, se non gli anziani con problemi di salute pregressi. Poi si è visto che le cose erano ben diverse e che in **Lombardia** si è avuta una percentuale di decessi superiore al **10%**, contro il **2.5 - 3 %** indicati dalla **Cina** (almeno secondo i dati ufficiali pubblicati).

Si sono date colpe alle strutture ospedaliere inadeguate, alle sale di terapie intensive non sufficienti e/o male attrezzate, alla mancanza di protocolli per la cura della **COVID 19**, al numero di tamponi effettuati (*sempre sotto controllo per non evidenziare maggiormente i casi positivi*), alla mancanza di respiratori polmonari, alla gestione delle forniture mediche, alla mancanza di reagenti, di medici e di infermieri.

Vi è poi il problema della **preparazione di un vaccino anti COVID 19**. Decine di società, in tutto il mondo, sono interessate al ricchissimo mercato che si prospetta per questo vaccino risolutore e si stanno facendo passi da gigante per le sperimentazioni previste dai protocolli internazionali.

E ancora una volta c'è stato il solito carosello di notizie: *per qualcuno il vaccino sarà pronto a settembre, per altri a dicembre, per altri fra almeno un anno e mezzo, per altri ancora fra due anni*. Non manca poi il *pessimista integrale* che preannuncia *l'inutilità di qualunque vaccino* a causa delle mutazioni continue e certe del coronavirus.

A queste considerazioni si aggiungono poi le **posizioni a favore e contrarie** per qualunque vaccino (**NOVAX** e **SIVAX**) tipici di una società *male informata e condizionata* dai mezzi di informazione e dai centri di potere.

Introduzione al seminario

Il vero problema italiano deriva dall'**altissima percentuale di *analfabeti funzionali***, come li definisce l'UNESCO dal **1984**, cioè di persone che pur avendo studiato e in possesso di un titolo di studio (diploma o anche laurea) **non è in grado di comprendere un ragionamento complesso e di formarsi un'idea personale** sui problemi che la vita ci pone.

Pare che in Italia (penultima nazione europea in questa triste classifica) si abbiano (fonte ***Ocse-Piaac del 2016***) oltre il **28% di *analfabeti funzionali*** (*detti anche **ignoranti funzionali***) incapaci di avere un'idea personale su tutto e, in particolare, anche sulla pandemia per la **COVID 19**.

Ne deriva un carosello di interpretazioni che vede persone favorevoli e contrarie a tutto e che, comunque, **non sanno decidere su nulla essendo dei perfetti creduloni**.

Non mancano i soliti imbecilli che mettono in rete notizie false (**fake news**) immediatamente lette, recepite e amplificate dagli **ignoranti funzionali** con effetti sociali imprevedibili. Notizie che qualcuno manovra ad arte per i propri fini.

Da sempre in un avvenimento grave c'è chi si arricchisce e chi si impoverisce.

Introduzione al seminario

Fra i tanti **santoni** apparsi nei vari programmi televisivi, non sono mancati **menti sapienti** di medici di vario genere che si sono sentiti in diritto di travalicare i loro limiti di **competenze professionali**.

I **virologi** si sono sentiti in dovere di **pontificare** su argomenti non di loro pertinenza, quali gli **impianti di climatizzazione**, ad esempio fornendo indicazioni (poi divenute **norme** emanate da enti nazionali, ad esempio **dall'ISS**, e dalle regionali) su come far funzionare gli impianti di climatizzazione, sul ricircolo dell'aria, come e quando fare la manutenzione dei filtri.

I vari **Comitati Tecnico Scientifici, CTS**, vera panacea di tutti i mali italiani, hanno dato pareri (**segreti**) su tutto e su tutti, spesso perdendo il riferimento alla concretezza e alla realtà.

I suggerimenti dei vari **CTS** si sono tramutati in decreti vari (*D.P.C.M., decreti dei Presidenti di Regione, Decreti comunali,*) che hanno ridisegnato lo **stile di vita** dei cittadini con limiti alle distanze minime interpersonali, obblighi per l'utilizzo di mascherine e guanti, per l'uso di sanificatori superficiali ed ambientali, per il numero massimo di persone che possono permanere all'interno delle macchine o dei negozi o dei parrucchieri, ...

Immaginare di ritornare alla vita sociale antecedente il **10 marzo 2020** sembra un miraggio e vivere imbrigliati da **norme, regolamenti, DPI e controlli di vario genere** contribuisce a rendere più difficile credere che possa essere una vita normale.

Introduzione al seminario

Si vedrà, nel corso del seminario, che le modalità di contagio dal virus **SARS-CoV-2** sono due:

1. **Contagio a breve distanza:** determinato dalle goccioline organiche (dette **droplet**) che sono emesse dai soggetti infetti e che entro una distanza di 2 metri circa (dopo cadono a terra per gravità) possono **investire direttamente soggetti sani** suscettibili di contagio o trasportati con le mani a contatto con la bocca, il naso e gli occhi;
2. **Contagio a lunga distanza:** determinato dall'**aerosol** che si viene a formare con i **nuclei di droplet**, cioè con ciò che resta dei droplet qualche secondo dopo la loro emissione per effetto dell'evaporazione nell'ambiente. Gli **aerosol** sono molto più leggeri dei **droplet** e permangono sospesi nell'aria per ore e possono essere respirati dai soggetti sani.

L'**Organizzazione Mondiale della Sanità ((OMS)** ha inizialmente riconosciuto ufficialmente solo il primo metodo di contagio mentre è rimasta dubbiosa sul secondo metodo.

In effetti il metodo a **breve distanza** è quello più diretto e inconfutabile di contagio e su questo i **virologi** hanno dettate le regole fondamentali di protezione basate sul:

1. **Il distanziamento interpersonale;**
2. **l'utilizzo delle mascherine e dei guanti (nei casi nei quali sono necessari);**
3. **il lavaggio delle mani;**
4. **Sanificazione dei locali.**

Nulla è stato detto sulla protezione a **lunga distanza** mediante gli impianti di aereazione, cioè mediante la diluizione dei patogeni con la **ventilazione** dell'aria fresca esterna.

Introduzione al seminario

L'**OMS** ha di recente riconosciuto l'importanza del contagio a **lunga distanza** ma i virologi sembrano essere rimasti indifferenti a questa notizia.

Basta osservare l'enorme dibattito che si è avuto per la riapertura delle scuole a settembre imperniato solo sulle misure per limitare il contagio a **breve distanza**.

Eppure, dalla metà del secolo scorso (**1961**) ci sono stati ampi riferimenti alla possibilità del contagio per via aerea tanto da avere pubblicato migliaia di lavori scientifici su questo argomento.

Walls e Riley hanno presentato il loro modello, rivisto nel **1974**, sul calcolo della probabilità di contagio per via aerea.

Nel **1999** le ricercatrici italiane **Gammaitoni e Nucci** hanno introdotto un nuovo e apprezzatissimo modello di calcolo che supera alcune limitazioni del primo.

Nel **2004 Rudnick e Milton** hanno introdotto un nuovo modello che si discosta dai primi due perché ricavano la probabilità di rischio di contagio per via aerea tramite la misura indiretta della CO₂ prodotta per le attività di respirazione, espirazione e re-respirazione dell'aria all'interno degli ambienti.

Ma per l'ISS e i vari ministeri il problema della trasmissione per via aerea sembra non esistere ancora. C'è un silenzio assordante! Sappiamo bene che per limitare il rischio di contagio nei locali chiusi occorre diluire i patogeni incrementando la ventilazione ma questo problema non è stato mai affrontato!

Introduzione al seminario – Gli effetti degli edifici sul virus

E' chiaro che parlare di **impianti di ventilazione**, o comunque di **impianti di climatizzazione** in generale, non è di pertinenza dei medici, e in particolare dei **virologi**, per cui il disinteresse verso di essi è totale e ingiustificato.

Può essere interessante fare un'analogia fra trasmissione del suono (per via aerea) e trasmissione del contagio (sempre per via aerea) all'interno degli edifici.

All'aperto il suono si propaga sempre in avanti a meno che non incontri ostacoli che lo riflettano. Parliamo all'aperto con molta più fatica di quanto ne spendiamo al chiuso. Infatti, all'interno degli edifici le onde sonore subiscono una notevole quantità di riflessioni che determinano un effetto particolare e importante detto **riverberazione acustica**, cioè un effetto di amplificazione complessa che trasforma il suono stesso in modo che solo dal 1906, con W.C. Sabine, sappiamo controllare.

Ebbene, anche per l'**aerosol** composto da nuclei di droplet le cose vanno in modo simile: la produzione di aerosol dovuta alla presenza di persone infette all'interno degli ambienti fa crescere la sua **concentrazione** sempre di più a meno che non si intervenga a diluirla mediante la **ventilazione con aria esterna fresca**.

E' un fenomeno ben conosciuto e utilizzato per il controllo della **qualità dell'aria (IAQ)** mediante diluizione degli inquinanti.

Se non si interviene con la **ventilazione**, come si dimostrerà nel prosieguo, **la concentrazione del patogeno cresce sempre di più e con essa anche la probabilità di contagio per via aerea.**

Introduzione al seminario

Dalla lettura di articoli scientifici che riferiscono di osservazioni superficiali non ben approfondite di alcuni casi di contagio (tipico è stato il caso del **ristorante di Guangzhou** che si vedrà più avanti) sono state avanzate **ipotesi errate** sulla possibilità che il contagio potesse essere favorito dagli impianti di condizionamento (nel caso del ristorante di **Guangzhou** si trattava di impianti split) per effetto del trasporto del virus (**droplet**) nell'aria movimentata dall'impianto.

La notizia è stata ripresa e ripresentata in modo ancora più errato dal altri virologi, fra i quali la dott.sa **Ilaria Capua**, che hanno molto allarmato l'opinione pubblica e gli stessi organi di controllo ufficiali (vedasi l'**Istituto Superiore della Sanità, ISS**) che, anche per effetto di quanto è avvenuto nei reparti di terapia intensiva degli ospedali lombardi, hanno puntato il dito contro gli impianti addirittura **imponendo di spegnerli** per evitare una presunta trasmissione dei contagi.

La dott.sa **Capua** ha addirittura ipotizzato che il virus potesse essere **trasportato nei canali d'aria** alimentando la diffusione in tutti gli ambienti. Aveva chiaramente confuso il contagio da **Legionella** con quello da virus **SARS-CoV-2**.

La **Legionella** è un **batterio** che ha una sua vita riproduttiva propria e può sopravvivere anche al di fuori dell'uomo mentre il **virus** può **sopravvivere solo se penetra all'interno delle vie respiratorie dell'Uomo** entrando nelle cellule stesse del tessuto respiratorio (e probabilmente anche di altri organi). E questo la nota virologa avrebbe dovuto saperlo!

Introduzione al seminario – I pregiudizi

Per avere un'idea dei **pregiudizi** sorti sull'utilizzo degli **impianti di condizionamento** dell'aria, e più in generale degli impianti di ventilazione in grado di movimentare l'aria negli ambienti, basta fare una semplice ricerca su *Google* per avere notizie sul tipo di quelle riportate in figura.

Coronavirus, dubbi sugli impianti di climatizzazione

tvsvizzera.it · 4 giorni fa

Gestire il condizionamento in modo intelligente grazie a Enel X

TGCOM · 25 giu

Coronavirus, OMS: "Il peggio deve ancora arrivare". Esopo, il lupo...

TRIESTEALLNEWS · 3 giorni fa

Aria condizionata: consigli per usarla in sicurezza

DiariodelWeb.it · 29 giu

Coronavirus, climatizzatori e impianti di aerazione, quali precauzioni prendere?

Qualenergia.it · 17 mar

Il sistema di condizionamento in Ospedale può favorire il contagio?

COOPERATIVA RADIO BRUNO srl · 3 giu

Climatizzatori e condizionatori propagano il coronavirus?

Corriere della Sera · 13 apr

Coronavirus, climatizzatori riducono rischi. Il punto di Aicarr

Energia Oltre · 16 apr

D' Ambrosio: Sono in grado non solo di garantire un buon ricambio dell'aria, ma anche l'unica soluzione per diluire la concentrazione del coronavirus negli ambienti chiusi

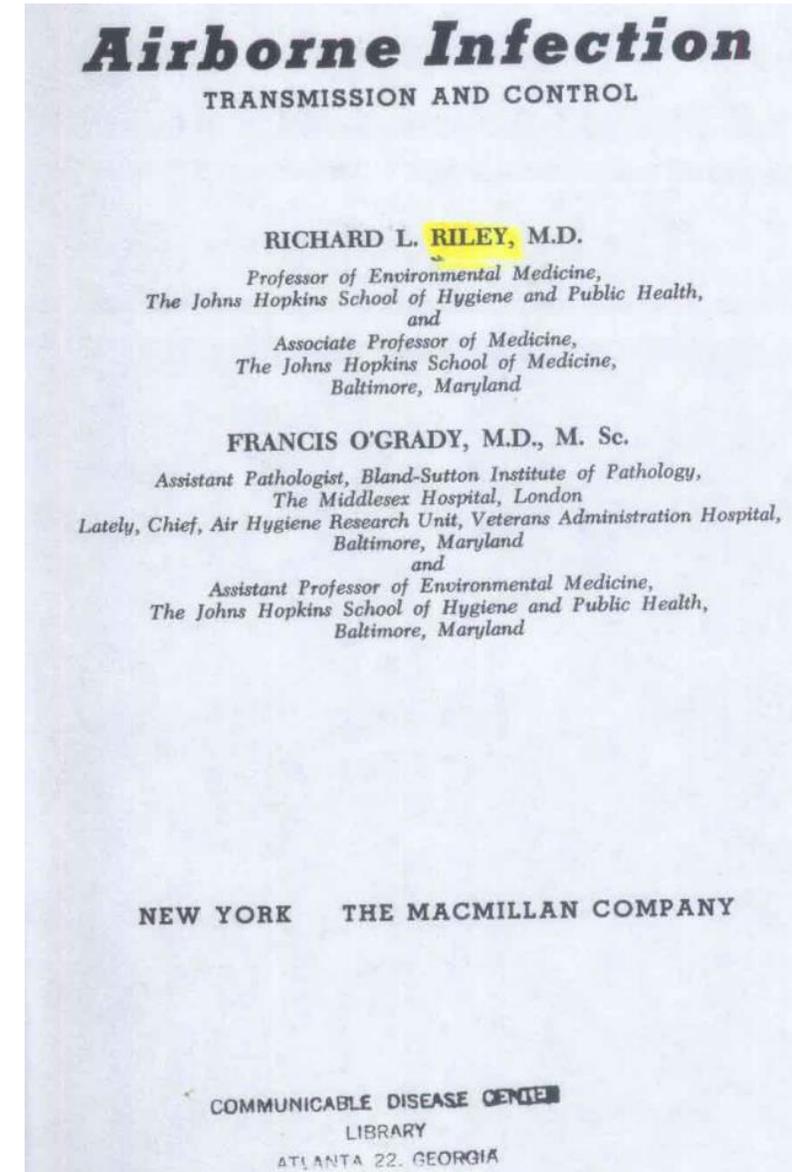
Introduzione al seminario – I pregiudizi

Eppure basta leggere le innumerevoli pubblicazioni scientifiche dei maggiori enti di ricerca per rendersi conto che il problema del contagio per via aerea è noto da decenni e affrontato con i metodi di calcolo che saranno presentati nei prossimi capitoli.

Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities

Recommendations of CDC and the Healthcare Infection Control
Practices Advisory Committee (HICPAC)

U.S. Department of Health and Human Services
Centers for Disease Control and Prevention (CDC)
Atlanta, GA 30333



Introduzione al seminario – Le reazioni

In Italia si è avuta una **reazione forte sulle posizioni dei virologi** nei riguardi degli impianti di condizionamento, grazie all'intervento tempestivo ed professionale della Presidente pro tempore dell'**AICARR**, *prof.ssa Francesca Romana D'Ambrosio*, che ha più volte denunciato gli equivoci e i pregiudizi sorti già nei primi mesi del 2020. L'**AICARR** ha presentato alcuni documenti tecnici ed un **Position Paper** nel quale si **contestano le affermazioni pregiudiziali dei virologi** e si propongono soluzioni impiantistiche atte a ridurre i contagi da corona virus. Dai contatti avuti con alcuni funzionari dell'**ISS** si sono avuti alcuni cambiamenti significativi in alcune circolari alle quale sono seguite modifiche anche nelle disposizioni ministeriali e regionali sull'utilizzo degli impianti. Nella settimana del 8/07/2020, a seguito di una lettera di **239 scienziati di tutto il mondo** che evidenziavano la possibilità del contagio da **SARS-CoV-2** anche tramite **aerosol**, l'**OMS** rispondeva ufficialmente con una conferma anche del **contagio a grande distanza**.

**L'Oms conferma:
"Prove sulla
trasmissione per
via aerea del
virus"**



La risposta dell'agenzia Onu dopo la lettera pubblicata da 239 scienziati che sottolineavano la possibilità del contagio tramite le goccioline nell'aria

Introduzione al seminario – Gli effetti

La trasmissione area di **lunga distanza** tramite **aerosol** pone nuovi problemi sui sistemi di protezione del contagio oggi approvati e su **nuove disposizioni** che **dovranno essere introdotte** per tenere conto della **ventilazione degli ambienti**. Il **New York Times** così si esprime (07/07/2020).

Mascherine ancora necessarie?

Se così fosse, riporta il New York Times, le mascherine sarebbero necessarie anche negli spazi al chiuso, a prescindere dal distanziamento sociale. Ma implicherebbe anche una revisione dei sistemi di ventilazione nelle scuole, negli ospizi, nelle case e negli uffici per minimizzare il ricircolo dell'aria. La lettera degli scienziati genera una certa

preoccupazione. Fino a questo momento, infatti, l'Oms aveva ribadito a più riprese che il virus non è generalmente aerobico, sostenendo al contrario - come, da ultimo, in un documento del 29 giugno - che il Covid-19 si trasmette per via aerea solo in condizioni estreme, come ad esempio nel corso di una serie di procedure mediche nelle quali si generano degli aerosol. In altre parole la ricerca sembra destinata ad avere un impatto importante sulle raccomandazioni in materia di prevenzione.

Introduzione al seminario – Le motivazioni

Quanto è successo in Italia dal **marzo 2020** al **maggio 2020**, brevemente esposto in precedenza, ha indotto in me lo stimolo di un **aggiornamento professionale** sulle tematiche, inusuali e insolite, che riguardano il **funzionamento e l'utilità degli impianti di climatizzazione e di ventilazione** alla luce delle conoscenze sul virus **SARS-CoV-2** e la malattia generata **COVID-19**.

Ho anche pensato di portare a conoscenza questi studi ai colleghi che ne fossero interessati, sia professionalmente o anche solo culturalmente.

Gli argomenti trattati, presentati in due seminari distinti, sono insoliti per gli ingegneri e per i tecnici in genere. Si richiede un po' di attenzione sulla prima parte del seminario (più teorica) dedicata principalmente alle **problematiche del contagio virale per via aerea**.

Si ribadisce che quanto presentato in questo seminario non vale solamente per il contagio dal virus **SARS-CoV-2** ma anche per tutti i virus e batteri che si trasmettono tramite il meccanismo delle goccioline organiche (**droplet**) espulse per via orale o nasale (**respirazione, parlato, tosse e starnuto**).

Proprio quest'identità del meccanismo di trasmissione ha consentito di utilizzare le esperienze pluri decennali acquisite nello studio della diffusione di altre epidemie quali la **SARS**, l'**influenza**, la **MERS**, il **morbillo** e la **tubercolosi** (che non è generata da un virus ma dal bacillo di **Koch**).

Programma dei seminari

Il **seminario** è suddiviso in **due parti** di quattro ore ciascuno, in giornate diverse.

1. La **Parte A** parla delle Problematiche del virus **SARS-CoV-2**, delle modalità di trasmissione e diffusione. Breve cenno alla ventilazione naturale e forzata. Si esamina il problema della produzione dei **quanta** negli edifici e si presentano delle **modalità di calcolo del rischio di contagio** con le relazioni di **Walls-Riley** e di **Gammaitoni-Nucci** e delle modifiche proposta da **Fisk e Nazaroff**, si presentano alcuni esempi di applicazione del calcolo del rischio di contagio e le considerazioni critiche sulle misure di protezione. Infine, si presentano le linee Guida pe i trasporti.
2. La **Parte B** presenta un'analisi **problemi impiantistici** per la riduzione del rischio di contagio a **lunga distanza**, con particolare riguardo ai problemi della **ventilazione meccanica**, al **ricircolo** e alla **filtrazione** dell'aria. Si analizzano in particolare alcuni casi studio: *un ufficio, un supermercato, un'aula scolastica*. Si presentano anche i punti di vista della maggiori **associazioni** del settore impiantistico: **AICARR, ASHRAE, REHVA** oltre che le circolari dell'**ISS**. Infine, si presentano le tipologie di impianti di climatizzazione, si discute sul problema della filtrazione dell'aria e l'utilizzo delle lampa U.V. per ambienti.

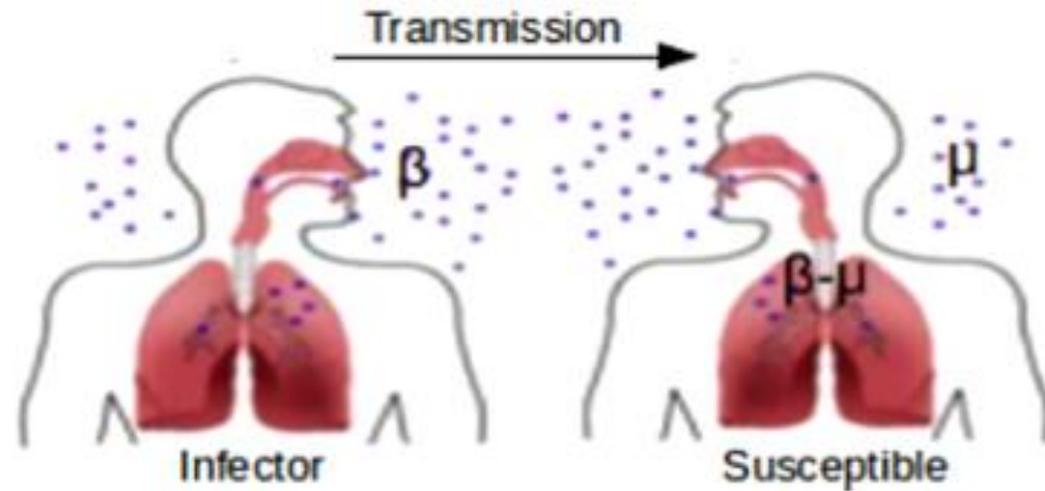
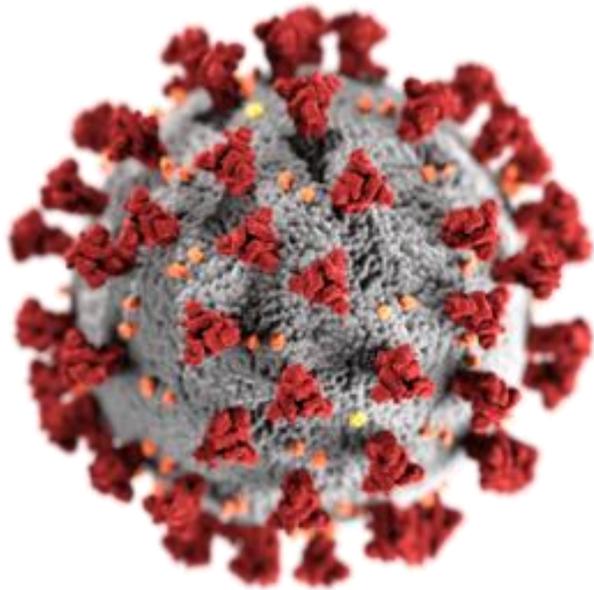
Programma del Seminario – Parte A

- Introduzione al Seminario
- Le problematiche della COVID 19
- Meccanismi di trasmissione della COVID 19
- **Meccanismi di trasmissione a breve distanza**
- Produzione dei Quanti negli edifici
- Casi censiti di trasmissione della COVID 19
- **Meccanismi di trasmissione a lunga distanza**
- La ventilazione naturale
- La ventilazione forzata
- La ventilazione in presenza di contagio – Relazione di Walls-Riley
- La ventilazione in presenza di contagio – Relazione di Gammaitoni Nucci
- Modifiche di Fisk e Nazaroff per le protezioni passive degli impianti
- Sintesi delle procedure di calcolo per la riduzione del rischio da contagio

Programma del Seminario – Parte B

- **Introduzione al Seminario Parte B**
- **Gli Impianti di Climatizzazione**
- **Distribuzione dell'aria mediante la ventilazione meccanica**
- **Effetti della ventilazione e la trasmissione aerea del virus**
- **Casi esempio per il calcolo del rischio di contagio personale**
 - **Openspace**
 - **Supermercato**
 - **Scuola Polifunzionale**
- **Norme e Decreti emessi in materia di misure di contenimento della COVID 19**
 - **Istituto Superiore di Sanità (ISS) – Raccomandazione 33/2020**
 - **Proposte AICARR per gli impianti in presenza di SARS-Cov-2**
 - **Documentazione ASHRAE per le malattie infettive e Position Paper**
 - **Documentazione REHVA per le malattie infettive e Position Paper**
 - **Linee di indirizzo per le attività commerciali 15/05/2020**
- **Tipologie di impianti di climatizzazione**
- **Filtrazione dell'aria**
- **Uso delle lampade U.V. per ambienti**
- **Linee Guida per i trasporto**
- **Conclusioni**

LE PROBLEMATICHE DELLA COVID 19



La scoperta della microbiologia

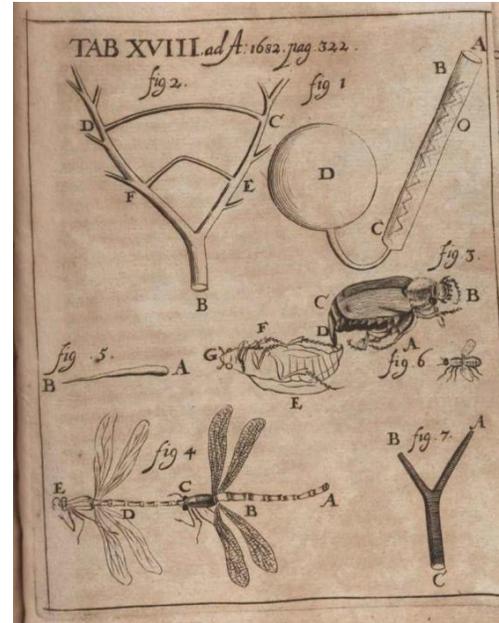
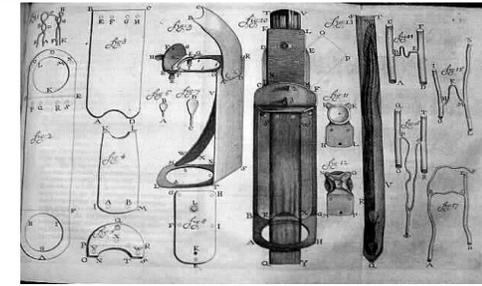
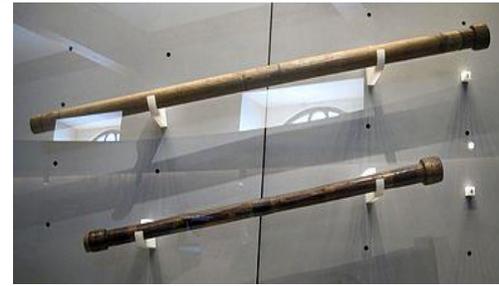
Nel XVII secolo si sono avute due scoperte fondamentali per la Scienza:

1. Il *cannocchiale* di **Galileo Galilei**;
2. Il *microscopio* di **Antoni van Leeuwenhoek**.

Il primo aprì le porte allo studio dell'Astronomia moderna con la visione di corpi celesti mai visti prima di Galilei.

Il secondo caso scoprì un mondo del tutto sconosciuto perché mai accessibile ad occhio nudo: il mondo *microscopico biologico* in una goccia d'acqua.

Antoni van Leeuwenhoek aveva messo a punto un microscopio avanzato con *270 ingrandimenti* che gli consentiva di vedere alcuni microrganismi (*piccolissimi insetti, batteri, spore*) **mai visti prima**. Egli riportava su carta le immagini catturate al microscopio, incantando tutti gli scienziati del tempo, sempre scettici su tutto ciò che non era accessibile ai nostri sensi (*Fisicalismo*). Iniziò così la *Microbiologia* e la *Medicina moderna*.



La comprensione del meccanismo delle malattie infettive

Fino alla metà del secolo scorso si pensava che le malattie infettive, in particolare la **tubercolosi**, si trasmettessero per via **ereditaria**, poiché se un membro di una famiglia si infettava di tisi anche i restanti componenti del nucleo familiare si infettavano.

In altri casi si pensava che il morbo si **trasmettesse nell'aria** che veniva ammorbata dagli infetti. Per questo motivo venivano spesso utilizzati falò e si segregavano gli ammalati nei lazzaretti.

Anche i medici del tempo pensavano di proteggersi dalle malattie infettive utilizzando una curiosa **maschera a forma di becco** per proteggere il viso ed un cappotto ricoperto di cera a protezione del corpo.

La maschera aveva un **naso** *“lungo una ventina di centimetri, a forma di becco, pieno di profumo e con due soli buchi – uno per lato accanto alla rispettiva narice – ma che era sufficiente a respirare, e che portava insieme all'aria l'effluvio delle erbe contenute lungo il becco”*.

Per puro caso quest'abbigliamento riusciva in qualche modo a proteggere i medici creando, così, una sorta di **dispositivi individuali** molto somiglianti agli attuali (mascherine, casco di protezione, tuta sigillata anti infezione,)



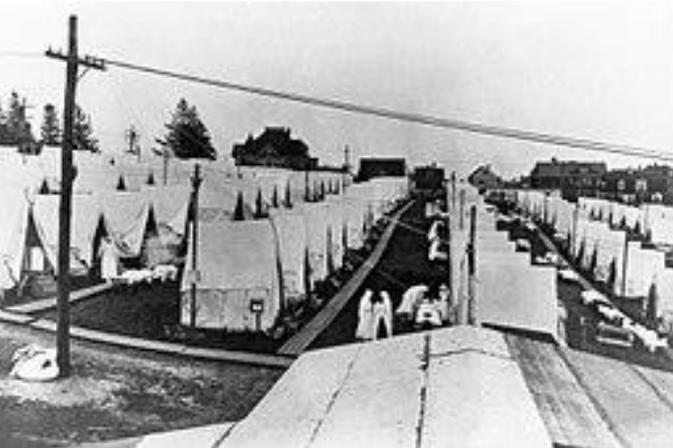
La comprensione del meccanismo delle malattie infettive

Dal **1918** al **1921** si diffuse nel mondo una terribile **pandemia**, detta **influenza spagnola**, che uccise circa **21 milioni** di persone. Si trattava di un virus della famiglia **H1N1** (tipico delle influenze) con elevata contagiosità e con mortalità del 20% almeno.

In quel periodo, a parte lo svolgimento di eventi bellici su grande scala, non si conoscevano questo **virus** (*i virus furono scoperti nel **1932** con la nascita del microscopio elettronico*) e le sue modalità di trasmissione. Si pensava ad un sorta di **effluvio nell'aria** come causa del contagio.

Anche allora si applicarono, almeno negli stati più avanzati, la **separazione** fra infetti e sani e l'utilizzo di **mascherine** facciali elementari per i dipendenti pubblici e i poliziotti. I meccanismi di diffusione, come pure le caratteristiche virologiche della **spagnola**, non erano noti e questo favorì fortemente sia la **diffusione pandemica** che la **mortalità**, non avendo alcuna cura, anche palliativa, per affrontarla.

Là dove queste misure vennero applicate si riuscì a contenere la diffusione della malattia. Se esaminiamo le foto dell'epoca possiamo accorgerci che **erano del tutto simili a quelle oggi seguite**.



La comprensione del meccanismo delle malattie infettive

Nel **1857 Florence Nightingale** (prima infermiera della storia, inglese di origine ma nata in Italia) scoprì, con semplici statistiche, che le sale degli ospedali per la **cura della tubercolosi** presentavano **minori contagi** se erano **ben aerate** con una buona **ventilazione naturale**.

Nel **1934 Walls** chiarì finalmente il meccanismo di trasmissione per via aerea, sia della tubercolosi che di altre malattie, attraverso il **meccanismo dei droplet**. Questa teoria è ancora oggi accettata e ulteriormente migliorata, come si vedrà nelle prossime pagine.

In questo lungo intervallo di tempo nulla è stato fatto per ridurre i meccanismi di trasmissione dei virus o dei batteri, mantenendo ancora validi i meccanismi di protezione con l'**isolamento** degli infetti in luoghi appartati. Oggi si conosce meglio il meccanismo di trasmissione per via aerea tramite **droplet** e sono state messe a punto metodologie di difesa efficaci per le malattie che non hanno possibilità di cura con un appropriato vaccino.

Per moltissime malattie, come per l'**influenza**, **il morbillo**, ..., si hanno già vaccini efficaci che riducono la pericolosità dei contagi. Inoltre, le conseguenze spesso blande (ad eccezione per il morbillo che negli adulti può risultare mortale) delle malattie e il basso tasso di infezione, bilanciato dal cosiddetto *effetto di protezione di branco*, hanno creato scarso interesse generale per la **virologia** e l'**epidemiologia** in questi ambiti.

Oggi siamo alle prese con un nuovo virus, denominato **SARS-CoV-2**, che pur avendo una minore mortalità rispetto ad altri virus (come per l'*ebola*, la *SARS* e il *morbillo*) ha una **grande capacità di trasmissione del contagio** e, a tutt'oggi, **non ha cure adeguate e/o vaccini**.

Il problema del COVID 19

In un periodo compreso fra **settembre 2019 e gennaio 2020** sono apparse notizie di infezioni da corona virus in **Cina**, a **Wuhan**, denominato **SARS – COV-2** (*coronavirus 2 da sindrome respiratoria acuta grave*). La malattia conseguente è stata denominata **COVID 19** (*Corona Virus Disease 19*). Non sappiamo quanto sia stato correttamente valutata la pericolosità di questo contagio e se sia stato realmente fatto tutto il necessario per impedirne la diffusione. E' un problema che riguarda anche la politica fra stati e il rispetto delle norme comportamentali dell'Organizzazione Mondiale della Sanita (**OMS**).

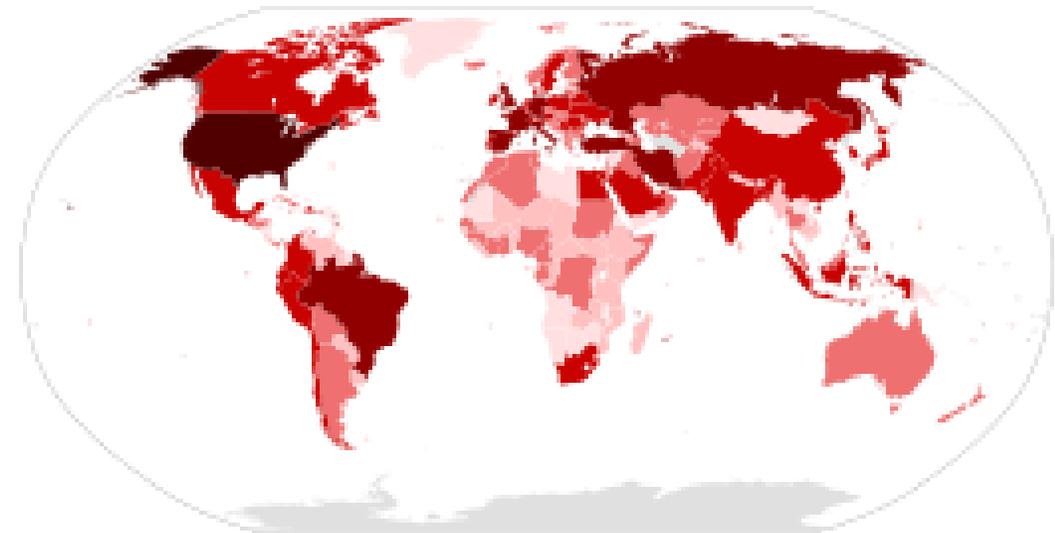
Dalla fine di gennaio **2020** le autorità cinesi hanno iniziato un rigido **lockdown** nella città di **Wuhan** e della provincia di **Hubei**, per un totale di circa *60 milione di persone*.

In Italia si sono avuti casi di **COVID 19** già a **fine gennaio – febbraio 2020** con un **lockdown** limitato in alcune aree della *Lombardia* e del *Veneto*.

A partire dal **10 marzo 2020** si è avuto il **lockdown totale** su tutto il territorio italiano con fasi di uscita programmate (*Fase 2, Fase 3,...*).

In tutto il mondo si è avuta una pandemia, come illustrato nella figura relativa al 13 maggio 2020.

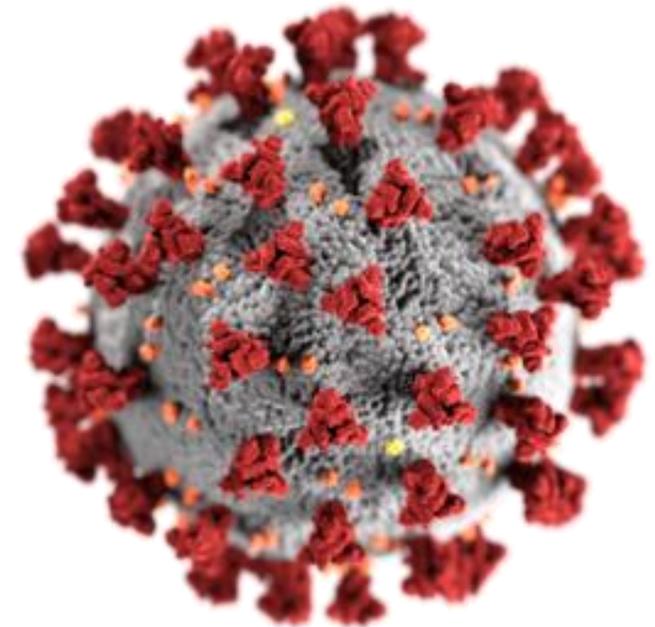
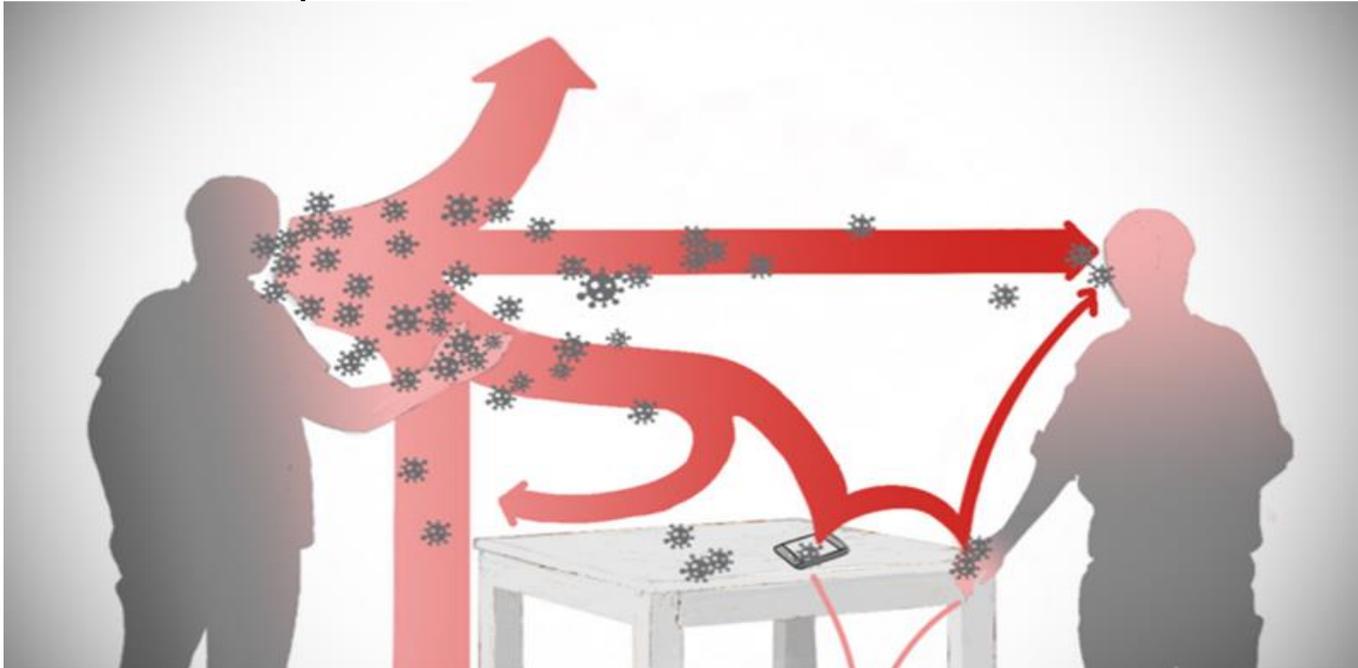
Le conseguenze sociali ed economiche della pandemia non sono ancora del tutto calcolate ma si ritiene che si tratti di **una delle maggiori crisi sanitarie ed economiche a livello planetario**.



Cos'è la COVID 19

La **COVID-19** (acronimo di **CO**rona**V**irus **D**isease **19**), è generata dal virus **SARS-CoV-2** appartenente alla famiglia dei **coronavirus**, altamente contagioso per l'Uomo. Attacca principalmente il *sistema respiratorio*, provocando polmoniti interstiziali, il *cervello* ed altri organi e, per una percentuale del **3-10%** (a seconda delle zone) risulta **mortale**.

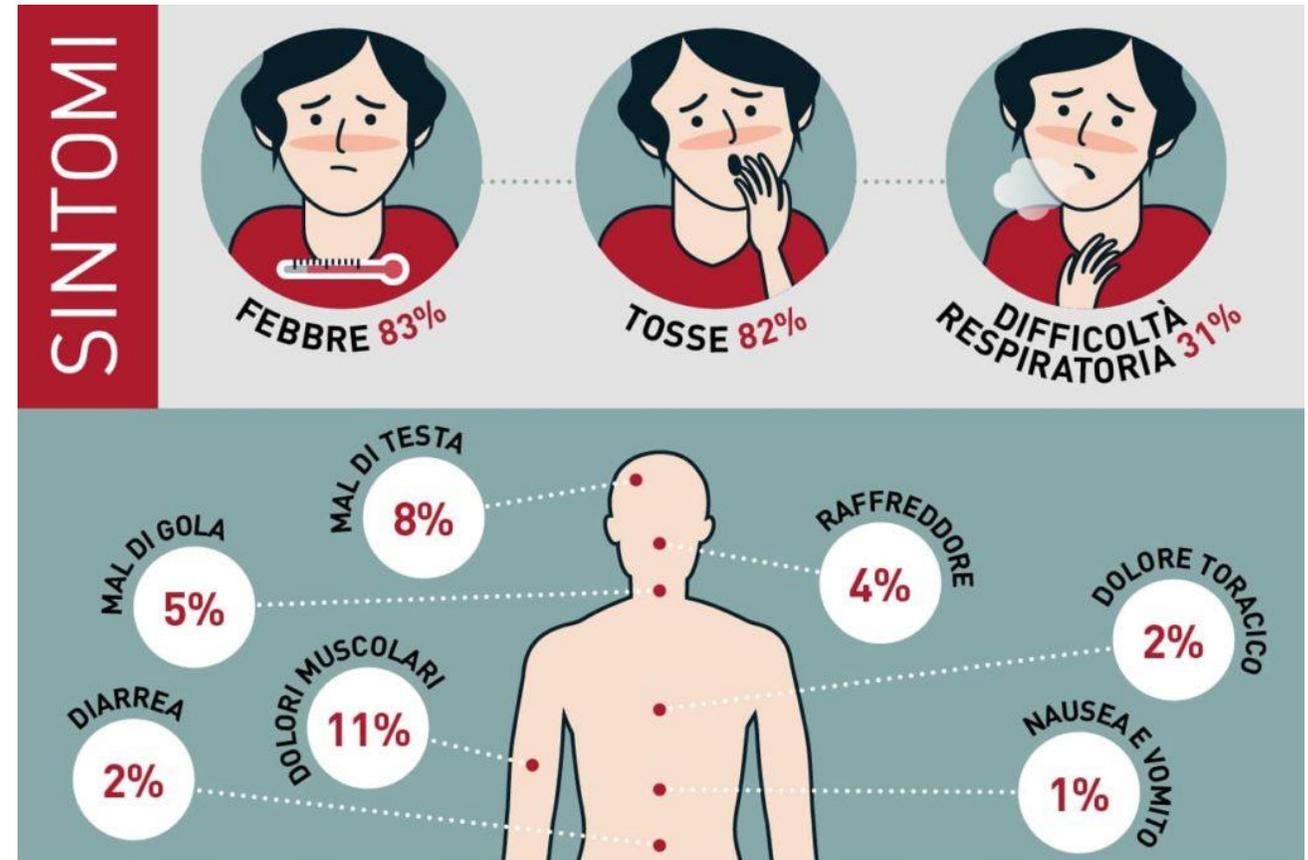
La **propagazione** diretta avviene tramite **droplet** (*piccole goccioline*) emesse dall'uomo con la **respirazione, la tosse, gli starnuti o anche con il semplice parlare**. Le minuscole goccioline (**droplet**) vengono lanciate in avanti dalla bocca e/o dal naso e possono colpire altre persone e/o depositarsi su oggetti circostanti. Toccando con le mani superfici infette si può avere il trasporto del virus nelle mucose del naso, della bocca e degli occhi e da qui penetrare all'interno del corpo umano.



Cos'è la COVID 19

La COVID 19 ha alcuni sintomi iniziali quali:

- **Febbre oltre i 37.5 °C;**
- **Tosse;**
- **Respiro corto;**
- **Dolori muscolari;**
- **Stanchezza;**
- **Disturbi gastro intestinali (diarrea);**
- **Perdita del gusto e dell'odorato;**
- **Altri sintomi minori.**



Si osservi come i sintomi in colore **rosso** sono **sovrapponibili** a quelli della comune **influenza** e questo ha determinato un ritardo iniziale nella rilevazione della nuova malattia.

I tempi di incubazione della **COVID 19** sembrano variare da **5 a 14 giorni** (in alcuni casi pare anche di più). Inoltre, a complicare le cose, si hanno anche individui **asintomatici** che non manifestano i suddetti sintomi ma sviluppano la malattia in **modo silente**, pur contagiando le persone con le quali vengono in contatto.

Diffusione della COVID 19

Sebbene solo da poco siano del tutto chiare le modalità di trasmissione del virus (cioè mediante **droplet** e mediante **aerosol**, del quale si parlerà nel prosieguo) è stato confermato che esso è in grado di passare con grande facilità da uomo a uomo. I **coronavirus** vengono trasmessi principalmente "**attraverso uno stretto contatto con un altro individuo, in particolare tossendo e starnutendo su qualcun altro che si trova entro un raggio di circa 1-2 metri da quella persona**".

Si ritiene, infatti, che nella maggior parte dei casi la diffusione tra persone avvenga attraverso le **goccioline** respiratorie emesse da un individuo infetto mediante **respirazione, tosse o starnuti** o anche **parlando ad alta voce** che, successivamente, vengono inalate da un soggetto sano che si trovi nelle vicinanze. È possibile infettarsi anche dopo aver toccato superfici od oggetti ove sia presente il virus.

Il **coronavirus**, in condizioni ideali, può infatti persistere su diverse superfici **per ore o per qualche giorno**. Sebbene i virus respiratori siano trasmissibili solitamente quando il soggetto malato presenta già i sintomi della malattia, sembrerebbe che il **SARS-CoV-2** possa diffondersi anche in occasione di un contatto ravvicinato con un paziente **asintomatico** o che presenti **sintomi in forma lieve**. Si stima che il **tasso netto di riproduzione** della trasmissione del virus da uomo a uomo sia tra il **2.13** e il **4.82**. Tale valore indica il numero di altre persone a cui un paziente appena infetto possa trasmettere la malattia. Secondo quanto riferito, al 24 febbraio il nuovo coronavirus è stato finora in grado di trasmettersi in catena fino a un massimo di **4** persone. Quando l'indice scende sotto **0.5** la diffusione sia sotto controllo.

Gli asintomatici da COVID 19

Il tempi di incubazione estesi fino a **14 giorni** (che è anche il periodo di **quarantena** di sicurezza) rende complessa ogni difesa dalla **COVID 19** perché **se la malattia non è pienamente sviluppata non è rilevabile**.

Pertanto, persone già infette ma non clinicamente rilevate possono liberamente infettare altre persone ignare del pericolo di contagio.

Allo stesso modo i soggetti **asintomatici** possono infettare ancora più liberamente altri soggetti, sfuggendo ad ogni controllo che non sia quello dei tamponi faringei.

I meccanismi di propagazione e di contagio sono numerosi e ancora sotto investigazione. Ne conosciamo alcuni che si vedranno in dettaglio e che forniscono le indicazioni di difesa passiva che conosciamo (**allontanamento sociale** in primo luogo).

Va detto che le goccioline emesse dall'uomo infetto (**droplet**) vengo trasportate in vari modi negli ambienti, specialmente in quelli chiusi.

Inoltre, la **ventilazione** (sia *naturale che meccanica*), se mal realizzata, può favorire la diffusione dei **droplet** e per conseguenza, nei casi negativi, il contagio.

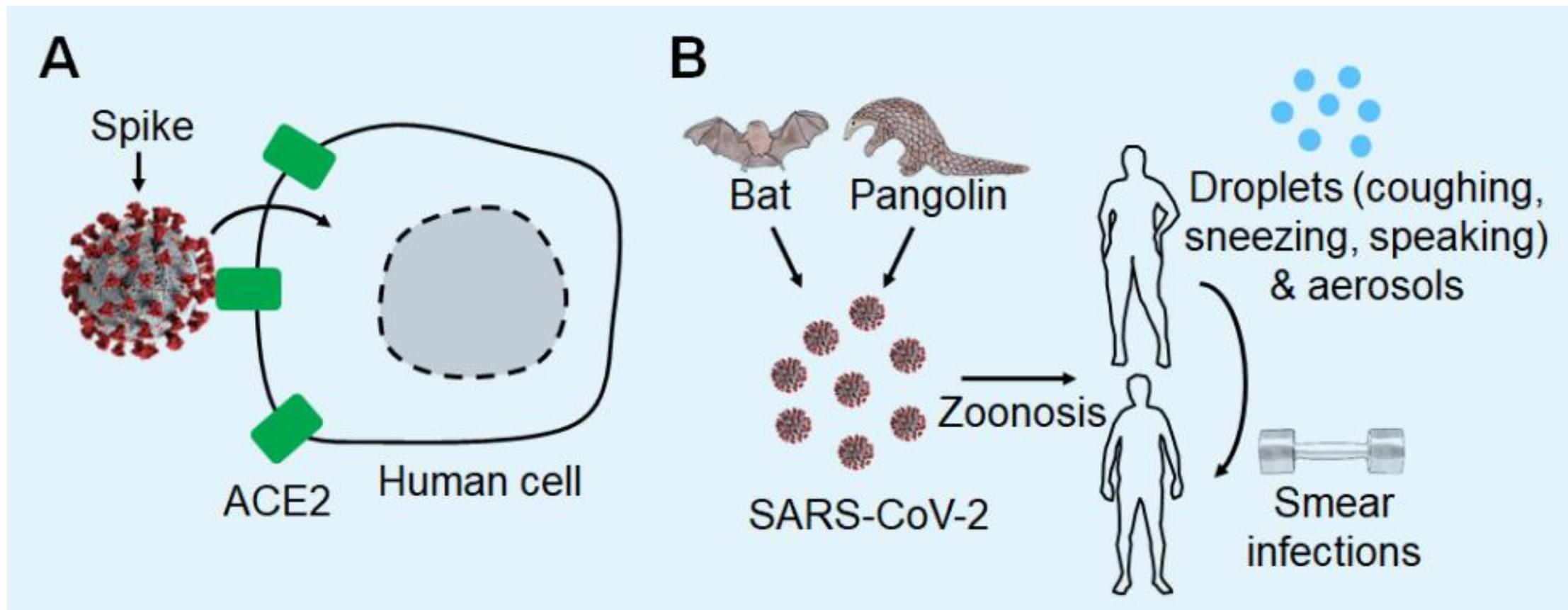
Dovendo poi parlare **di impianti di climatizzazione ambientale**, nei quali la ventilazione interna costituisce parte fondamentale, è opportuno conoscere tutti i meccanismi di trasmissione ad oggi noti per poterli prevenire o, comunque, ridurre gli effetti.

MECCANISMI DI TRASMISSIONE DELLA COVID 19



Meccanismi di trasmissione della COVID-19

In figura si ha una rappresentazione schematica della catena di contagio per la trasmissione della **COVID-19**.



A = La proteina **Spike** di **SARS-CoV-2** lega **ACE2** sulla superficie delle cellule umane per iniziare l'ingresso.

B = Il coronavirus **SARS-CoV-2** probabilmente si è mosso da **pipistrelli** o **pangolini** nell'uomo (**zoonosi**). Nell'uomo, le infezioni da **SARS-CoV-2** si verificano tramite **droplet**, **aerosol** e infezioni da **striscio**.

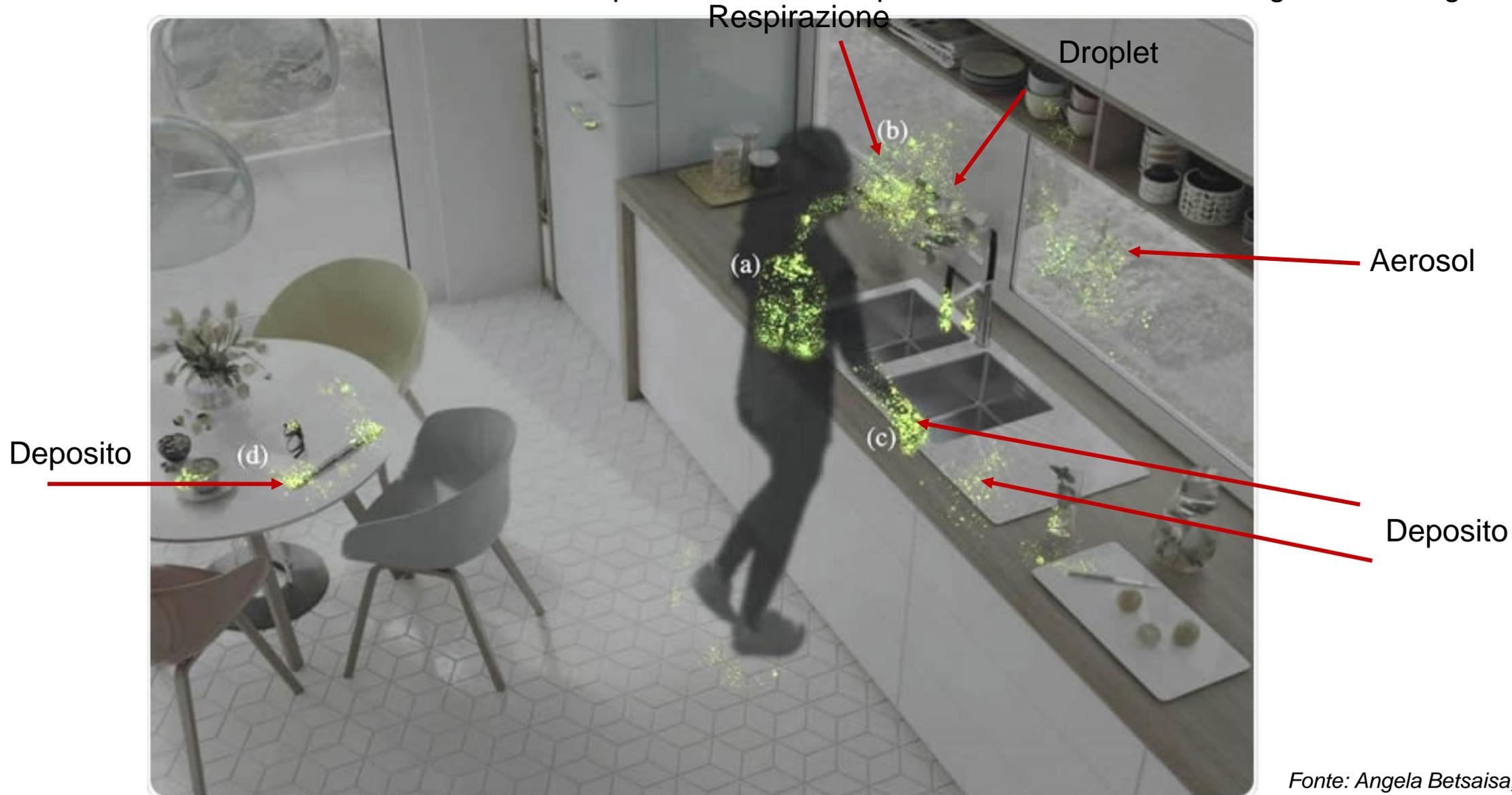
Meccanismi di trasmissione della COVID-19

Nella figura seguente si ha un tipico esempio di trasmissione del virus **SARS-CoV-2** per effetto della **respirazione** di un soggetto infetto in un ambiente domestico. Si possono osservare:

- **Emissione di goccioline** di liquido organico, dette **droplet**, che formano una nuvola iniziale davanti la bocca del soggetto infetto. I **droplet** di dimensioni maggiori (alcuni decine μm , vedi dopo) cadono dinnanzi al soggetto e si deposita sulle superfici orizzontali (cucina,);
- Parte dei **droplet evaporano** velocemente (vedi dopo) e si riducono di dimensioni (qualche μm) formando un **aerosol** molto leggero che si mantiene in sospensione aerea per molto tempo (fino ad una decine di ore). L'**aerosol** viene facilmente trasportato via dalle correnti d'aria generate dallo stesso soggetto infetto (*respirazione, parlato, movimenti del corpo, calore del corpo o di superfici viciniori,*) o dal flusso delle correnti d'aria creato dalla ventilazione naturale o dalla ventilazione meccanica;
- I **droplet** per via **aerea** o **depositati** sulle superfici contengono cariche virali sufficienti ad infettare al soggetti sani per **aspirazione** nelle vie aeree o per **trasporto** con le mani su superfici mucose quali la bocca, il naso o gli occhi;
- I **droplet** catturati con le mani possono poi depositarsi anche su altre superfici che la persona infetta tocca, anche senza accorgersene. Questi depositi sono ancora suscettibili di potere infettare altre persone nell'arco di **poche ore** (in alcuni casi di giorni).

Meccanismi di trasmissione della COVID-19

Meccanismo di trasmissione del virus SARS-CoV-2 per effetto di un colpo di **tosse** ed emissione di goccioline organiche

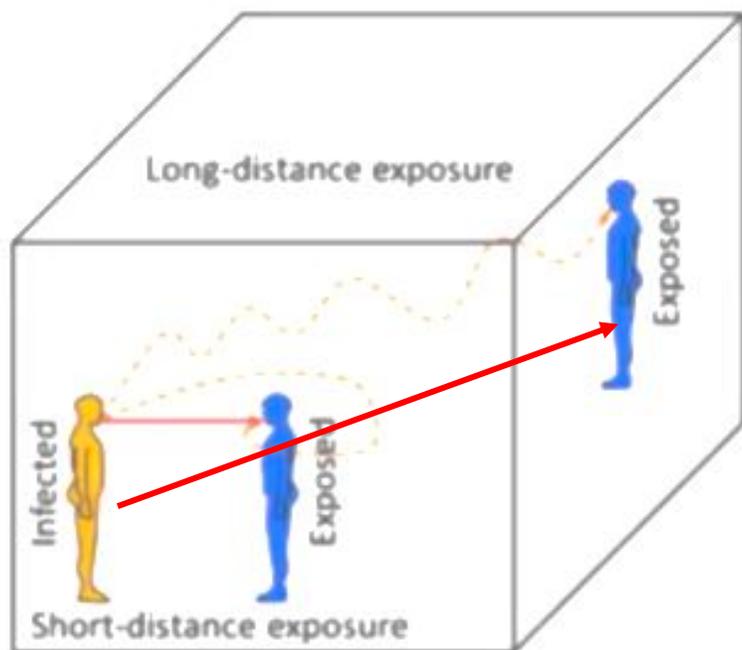


Fonte: Angela Betsaisa, BSN

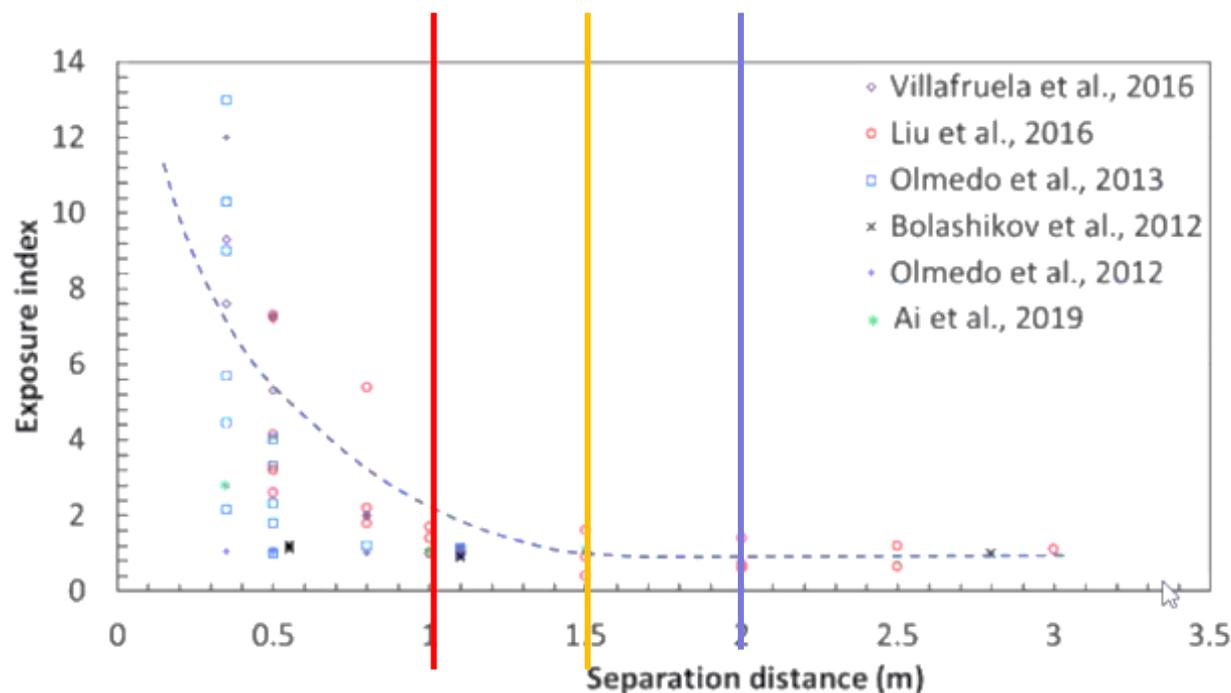
Meccanismi di trasmissione della COVID-19

Il meccanismo di trasmissione del virus **SARS-CoV-2** sono essenzialmente due:

1. Trasmissione a **breve distanza**, ove prevale il contatto diretto con le particelle di liquido (**droplet**) emesse dalla bocca o dal naso;
2. Trasmissione a **grande distanza**, per effetto dell'**aerosol** formato nel getto iniziale di liquido organico. Quest'**aerosol**, di dimensioni ridottissime rispetto ai **droplet**, permane in aria per alcune ore (da 3 a 10 e più) e può essere trasportato dalle correnti d'aria di ventilazione (naturale o meccanica). Anche se i virologi hanno inizialmente scartato la possibilità di contagio da **aerosol** negli ultimi studi **appare possibile un contagio**, seppur limitato, mediante questa modalità (curva distanze da *Ai Z.T. Melikov, Arsen Krikor, DTU Library 2018*).



Importance of separation distance between persons



Meccanismi di trasmissione della COVID-19

Sul meccanismo di trasmissione a **lunga distanza** tramite **aerosol** esiste un ampio dibattito con l'**Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS)** che fino a poche settimane fa non la considerava come verificata e certa.

Dopo che 239 scienziati internazionali abbiano scritto all'**OMS** che esiste ed è concreta la possibilità di **contagi per via aerea** (cioè tramite aerosol) si è finalmente avuta una risposta positiva anche da parte di quest'ultima.

La risposta è stata la seguente:

«Riconosciamo che ci sono prove emergenti in questo campo, come in tutti gli altri campi riguardanti il Covid-19 e quindi crediamo che dobbiamo essere aperti a questa ipotesi e comprendere le sue implicazioni riguardo alle modalità di trasmissione e anche riguardo le precauzioni da prendere».

Ammettere che **il contagio per via aerea è possibile** significa prendere in considerazione tutte le problematiche della **ventilazione** (naturale e forzata) fino ad oggi trascurate dai virologi. Significa anche predisporre misure di riduzione del contagio che, oltre a quelle di distanziamento e l'uso delle mascherine (tipiche per la **breve distanza**), considerino gli **impianti di ventilazione come componente importante per la soluzione di questo problema**.

Occorre, quindi, rivedere tutte le disposizioni fino ad ora emesse dagli organi di stato (**ISS, Ministeri, Regioni**) riguardo le limitazioni sull'utilizzo degli impianti di climatizzazione e di ventilazione.

Meccanismi di trasmissione della COVID-19

Malgrado che dal **1859** con **Florence Nightingale** si sia dimostrato che una buona ventilazione dell'aria contribuisce a rendere più salubri gli ospedali (in quel tempo dedicati alla sola **tubercolosi**) e che gli studi di **Walls, Riley, O'Grady** e **O'Connor** (1958, 1978, ...) abbiamo evidenziato, con prove sperimentali inoppugnabili, che **la ventilazione con aria esterna fresca riduce il rischio di contagio personale** per il **morbillo**, ancora oggi dobbiamo assistere ad una disputa tutta ideologica e di gelosie professionali che ha **ignorato**, durante tutto questo lungo periodo della pandemia in Italia e si continua ad ignorare ancora, **l'apporto benefico che un buon impianto di ventilazione può apportare per ridurre la diffusione del virus SARS-CoV-2 e di qualunque altro virus o patogeno in generale.**

Articoli scientifici (o auto definiti tali) pubblicati di recente da parte di medici che, pur non conoscendo le problematiche impiantistiche, hanno sentenziato in modo negativo sulle possibili cause di propagazione del contagio del virus, hanno contribuito a creare un **clima di diffidenza** ed un atteggiamento negativo **verso gli impianti di climatizzazione.**

Tutte le norme anti contagio emanate dal **Governo Italiano** per il riavvio delle attività produttive e per la riapertura delle scuole **fanno riferimento, ancora oggi, soltanto sulle misure antivirali a breve distanza con mascherine e distanziamento personale a 1 m, oltre al lavaggio delle mani e sanificazione degli ambienti.**

Bar, ristoranti, negozi dotati di impianti di climatizzazione sono stati costretti, o psicologicamente convinti, a spegnere gli impianti così incrementando la probabilità di rischio di contagio.

Meccanismi di trasmissione della COVID 19 – Tempi di permanenza

L'ISS ha pubblicato nella sua «Raccomandazione ad interim sulla sanificazione di strutture non sanitarie nell'attuale emergenza COVID-19: superfici, ambienti interni e abbigliamento» N. 25/2020 del 15/05/2020 la seguente tabella per i tempi di permanenza del virus sulle superfici.

Il virus **SARS-CoV-2** sembrerebbe essere **più stabile sulle superfici lisce** ed estremamente stabile in un ampio intervallo di valori di *pH* (*pH* 3-10) a temperatura ambiente (20°C).

Superfici	Particelle virali infettanti rilevate fino a	Particelle virali infettanti non rilevate dopo
carta da stampa e carta velina	30 minuti	3 ore
tessuto	1 giorno	2 giorni
legno	1 giorno	2 giorni
banconote	2 giorni	4 giorni
vetro	2 giorni	4 giorni
plastica	4 giorni	7 giorni
acciaio inox	4 giorni	7 giorni
mascherine chirurgiche strato interno	4 giorni	7 giorni
mascherine chirurgiche strato esterno	7 giorni	non determinato

Meccanismi di trasmissione della COVID-19 – Contagio a breve distanza

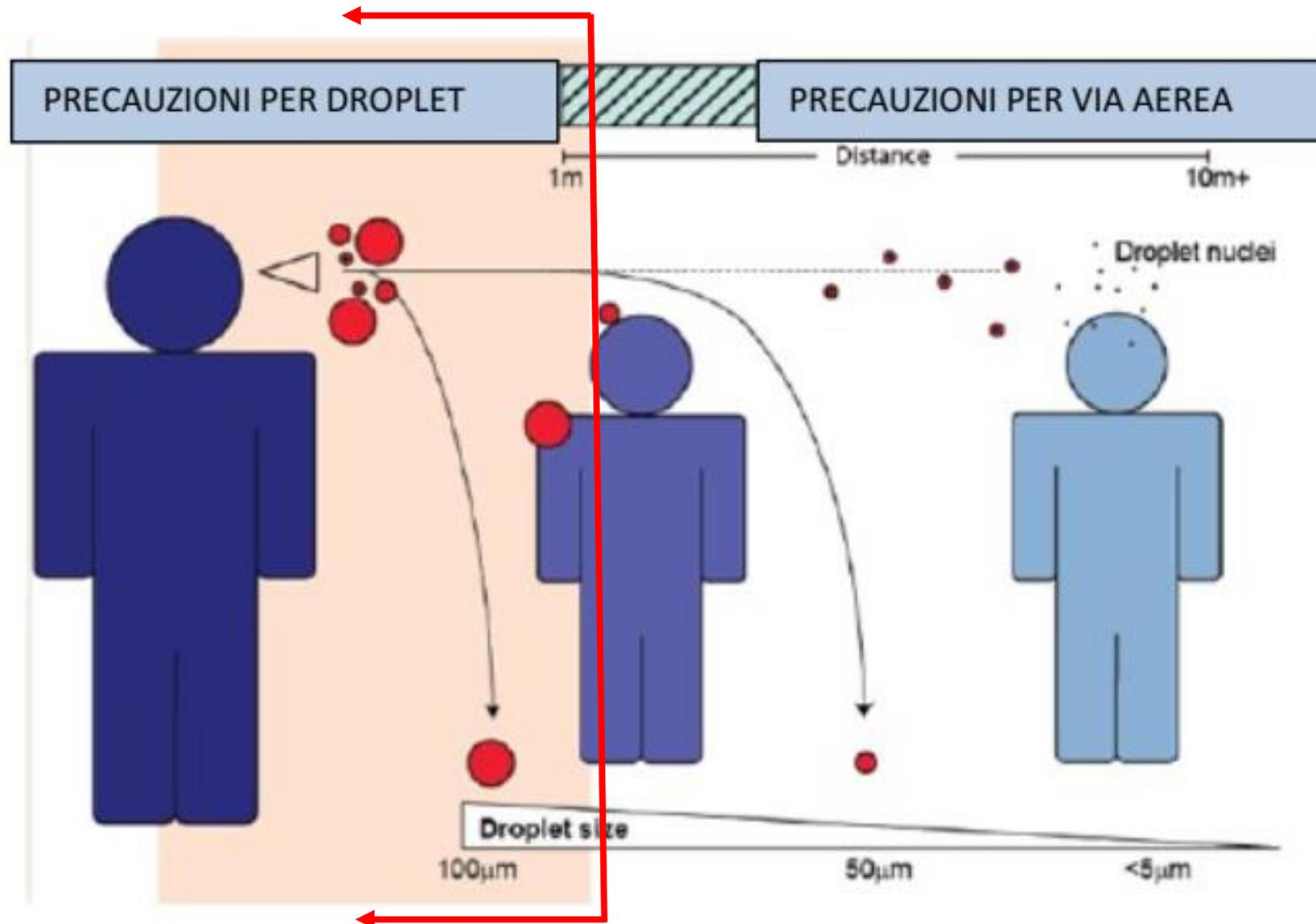
Tratteremo la **prima modalità di trasmissione** nella prima parte di questo seminario. Le modalità di **difesa dal contagio** sono essenzialmente:

- **Limitazione dei movimenti** della popolazione (**lockdown**);
- **Allontanamento** fra soggetti (vige il limite di 1 m, esteso a 2 m nelle sale da ballo);
- Utilizzo di **sistemi di protezione diretta** quali schermi, mascherine, guanti, ...

Sono questi i metodi indicati dai **virologi** per il controllo della diffusione del contagio a **breve distanza** e che hanno validità per qualunque tipo di contagio aereo, dall'influenza alla SARS al morbillo, ... Sono **disposizioni assolutamente valide** e che debbono essere doverosamente rispettate da tutti. Per questo tipo di protezioni **gli impianti di climatizzazione** possono fare ben poco ed anzi sono spesso considerati dai virologi come possibili **mezzi di facilitazione della propagazione dei droplet e del contagio**. Queste posizioni sono scaturite, come già osservato, da una serie di **considerazioni e interpretazioni errate** di ricerche recenti (vedi, ad esempio, il caso del ristorante di **Guangzhou**) e da preconcetti verso gli impianti che diffondono l'aria per ventilare gli ambienti.

Si dimostrerà che queste interpretazioni sono largamente errate e lo stesso **Istituto Superiore di Sanità** ha modificato alcuni sue posizioni iniziali che penalizzavano (e ancora in parte lo fanno, seppure in modo più ridotto) gli impianti di climatizzazione. E' proprio per la seconda modalità di trasmissione (a **lunga distanza**) che si dimostrerà l'utilità assoluta della **ventilazione meccanica** (e quindi degli **impianti di climatizzazione**) come unico mezzi di diluizione delle cariche virali in ambienti chiusi.

MECCANISMI DI TRASMISSIONE A BREVE DISTANZA



La generazione dei Droplet

I **droplet** sono goccioline di liquido organico proveniente dall'interno del corpo umano ed espulse per **respirazione, tosse, starnuto, parlato**. All'interno dei **droplet** vi sono numerosi virus (alcune *migliaia*) che costituiscono una **carica virale** capace di contagiare gli individui che li inspirano o li portano a contatto con le mucose nasali, degli occhi e della bocca.

Le dimensioni possono variare molto a secondo del meccanismo di emissione. Quelle con dimensioni $> 5 \mu\text{m}$, se inalate, tendono a restare intrappolati nel caso orofaringeo mentre quelle $< 5 \mu\text{m}$ possono raggiungere la parte inferiore del tratto respiratorio (bronchi, alveoli, ...) ed essere estremamente pericolosi.

I droplet emessi con dimensioni $> 5 \mu\text{m}$ tendono a cadere per gravità verso terra, perché relativamente pesanti rispetto ai **nuclei evaporati**, entro una distanza inferiore a 1 m.

I droplet con dimensioni $< 5 \mu\text{m}$, detti **droplet nuclei (aerosol)**, possono restare sospesi nell'aria più a lungo perché più leggeri e tendono ad essere propagati oltre 1 m di distanza.

Gli **aerosol** prodotti contengono droplet di diverse dimensioni che subiscono azioni diverse a seconda del contesto ambientale.

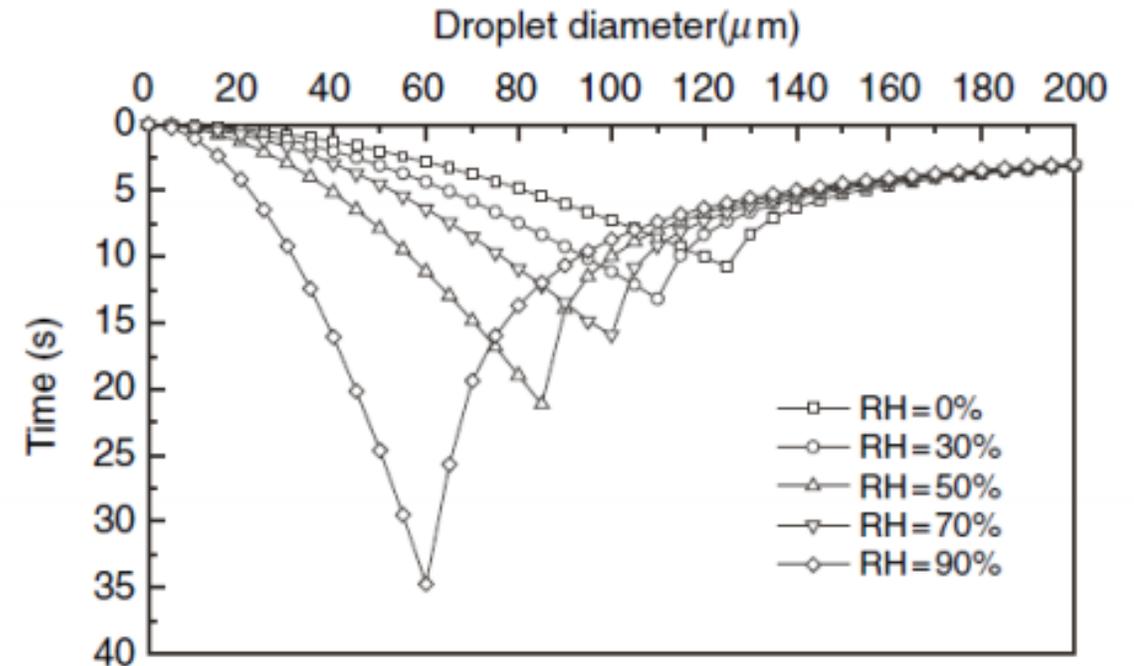
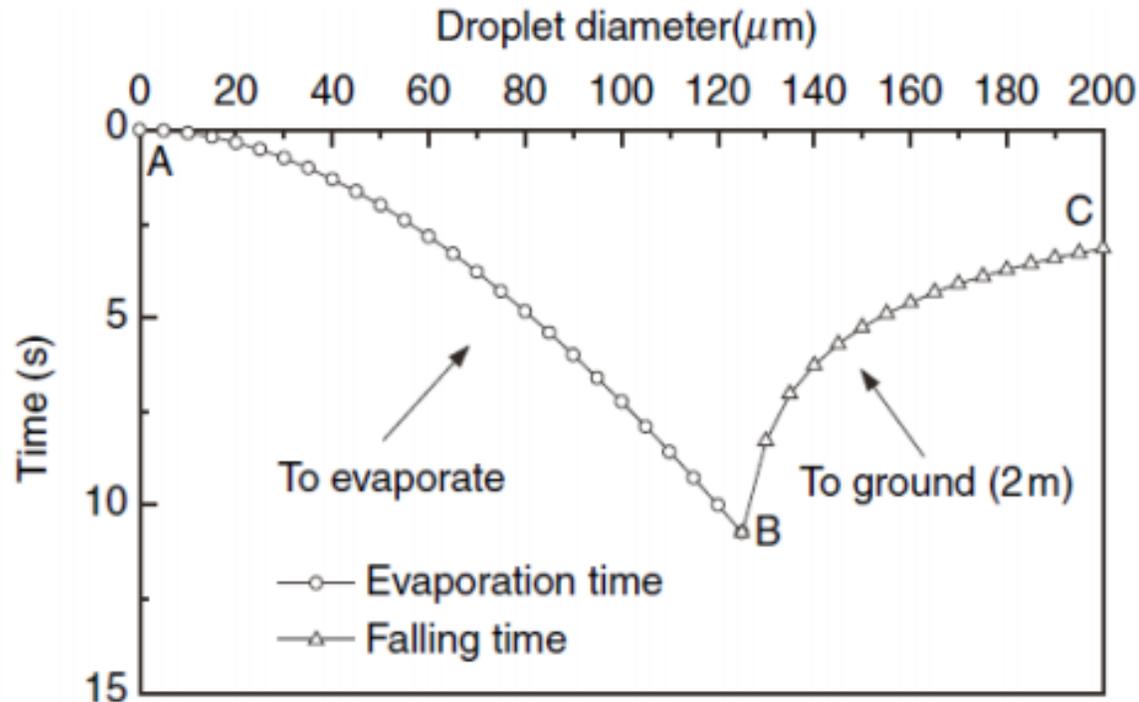
Alcuni subiscono l'azione della **gravità** e cadono a terra, altri vengono trasportati via dal **vento**, dal movimento delle persone o da **correnti convettive** generate da **differenze di temperatura** e di **umidità relativa**.

La **temperatura** influisce anche sull'**evaporazione** dei droplet rendendoli più piccoli e leggeri e favorendone la propagazione per sospensione.

Evaporazione dei Droplet

Nel 1934 **Walls** trovò che, in condizioni normali, i **droplet** con dimensioni $< 100 \mu\text{m}$ subiscono un'evaporazione **completa** prima di cadere al suolo ad una distanza di circa **2 m**.

Questa scoperta ha permesso l'istituzione della **teoria delle goccioline** e della trasmissione dei **nuclei di goccioline**, a seconda della dimensione della gocciolina infetta. La curva di caduta delle goccioline di **Walls** è importante per comprendere la trasmissione per via aerea e la trasmissione in generale dei **droplet**. Lo studio di **Walls** ha anche dimostrato che i **droplet possono trasformarsi in nuclei** di goccioline per **evaporazione**. Nelle figure si ha il tempo di evaporazione in funzione del diametro dei **droplet** per $T=33 \text{ }^\circ\text{C}$ e $UR=0\%$ e nella seconda per vari valori di UR (RH in inglese).



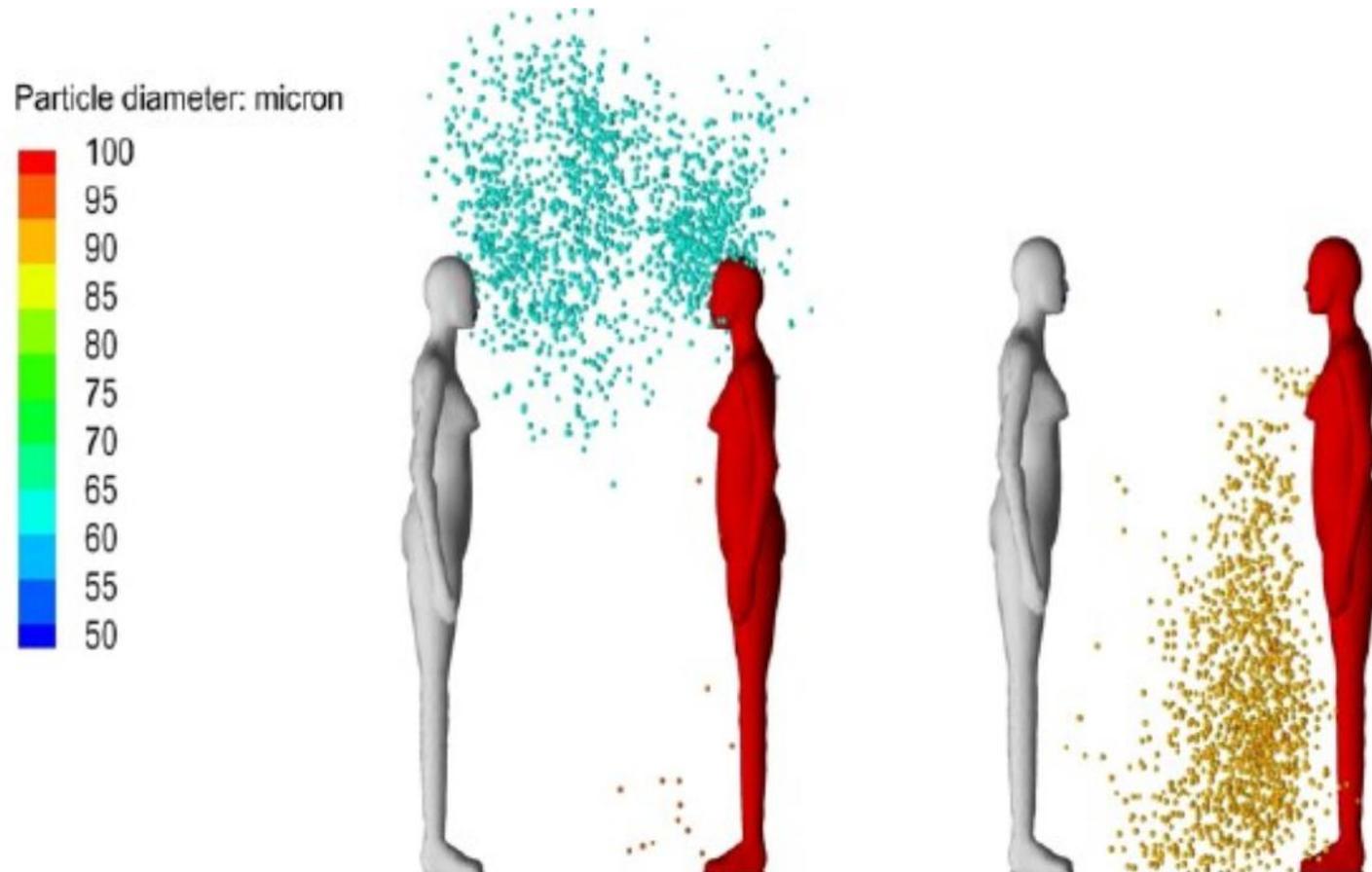
Meccanismi di trasmissione della COVID 19 – Tempi di deposito

L'ISS ha pubblicato nella sua «Indicazioni sugli impianti di ventilazione/climatizzazione in strutture comunitarie non sanitarie e in ambienti domestici in relazione alla diffusione del virus SARS-CoV-2 » N. 33/2020 del 25/05/2020 la seguente tabella:

Diametro droplet (µm)	Tempo di sedimentazione entro 5 "feet" (1,524 m)	Tempo di evaporazione a 18°C e U.R. 50%	Classificazione	Destino stimato	Rischio stimato
0,5	24~41 h	0,0 s	Small droplet	Evaporano prima di cadere al suolo, con eventuale formazione di bioaerosol di droplet nuclei	Carica infettante potenziale minima ma di lunga durata in aria in ambiente chiuso
1	7~12,0 h	0,0 s			
2	2,2~3,1 h	0,0 s			
3	1,1~1,5 h	0,0 s			
5	26~31 min	0,1 s			
10	7,9~8,2 min	0,2 s			
20	2,2~2,3 min	0,8 s			
50	22,5~28,6 s	4,5 s	Medium droplet	Sedimentano al suolo prima di evaporare entro una gittata che dipende dalla velocità di emissione	Carica infettante potenziale media dipendente dalle condizioni ambientali (temperatura, umidità, turbolenza, ecc.)
80	9,1~12,6 s	10,9 s			
100	5,8~8,6 s	16,5 s			
160	2,4~3,8 s	39,8 s	Large droplet	Sedimentano al suolo entro breve distanza	Carica infettante potenziale elevata ma di brevissima durata in aria
200	1,6~2,6 s	60,4 s			
500	0,3~0,5 s	5,6 min			
1000	0,1~0,2 s	21 min			

Influenza dell'umidità sui droplet

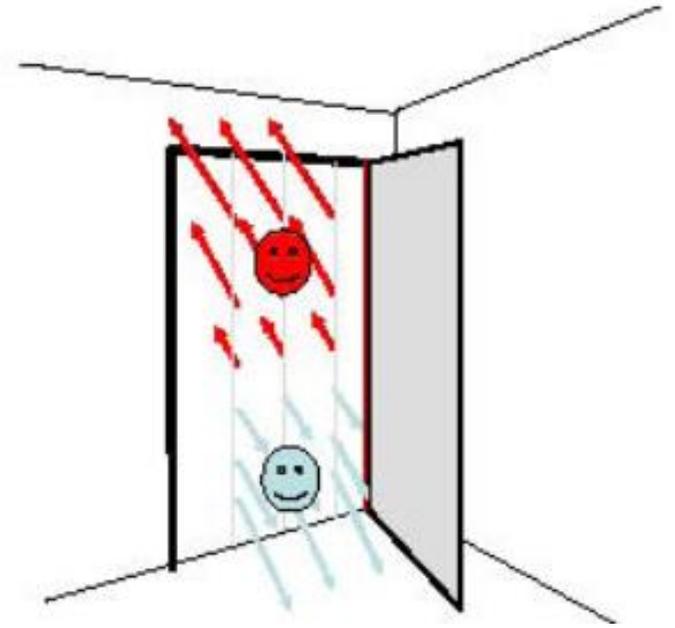
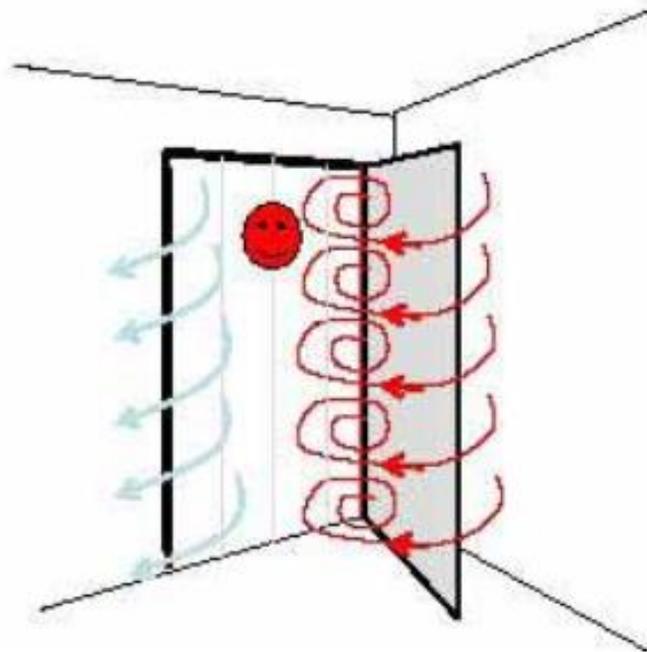
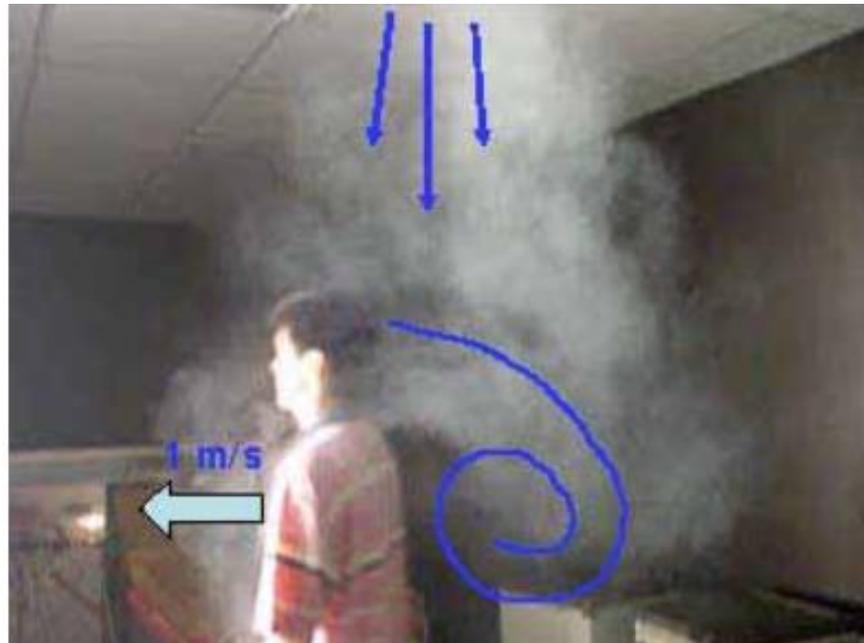
L'**umidità relativa** influenza il movimento dei **droplet** e in particolare tende a farli cadere in basso, come indicato in figura. I nostri impianti sono progettati per avere un'umidità relativa nominale del **50%** (condizioni di benessere). Potere innalzare questo valore significherebbe avere **droplet** di **diametro maggiore** che, scendendo verso il basso, eviterebbero di investire la faccia delle persone antistanti.



I Droplet e i movimenti dell'aria

I **nuclei di goccioline (aerosol)** che **galleggiano** nell'aria possono essere trasportati dal movimento dell'aria stessa. L'**entrainment** (cioè *l'immissione*) dell'aria nelle zone aeree vicine può verificarsi durante le attività quotidiane più innocue, per esempio, come risultato di persone che camminano, o l'apertura di una porta tra una stanza e il corridoio o spazio adiacente.

Inoltre, la **temperatura** dell'aria (e quindi la **densità** dell'aria) differisce fra ambienti comunicanti attraverso una porta aperta e questo causerà anche lo scambio d'aria tra i due ambienti, fornendo un secondo meccanismo per consentire di trasmettere l'aria fra ambienti.



Possibili percorsi dei droplet

Con la **respirazione normale**, le goccioline più grandi (**droplet**) cadono a terra entro un raggio di **2 metri**, ma possono anche evaporare velocemente e diventare **droplet nuclei**.

Tosse e starnuti possono spingere ulteriormente queste grandi goccioline fino ad almeno **6 metri** di distanza.

La distribuzione dei **droplet** è probabilistica (*Morawska 2006*). Non c'è nulla che garantisca che una goccia si fermi prima di una certa distanza.

Per la maggior parte delle malattie che utilizzano il meccanismo dei **droplet**, sapere dove finiscono le goccioline è abbastanza significativo.

A parte ciò, alcune fonti affermeranno che le particelle molto piccole non sono pericolose, perché anche se inspirate, rimangono nell'aria e **non vengono trattenute negli alveoli**.

Tuttavia, sembra che ciò non sia vero e che si possa avere fino al 50% di particelle inferiori a 1 μm **trattenute nel tratto respiratorio** (*Morawska 2006*).

Nella pagina seguente si riportano **possibili percorsi dei droplet** all'interno di una ambiente.

Si ricordi che nessuna previsione analitica può descrivere in modo esatto il percorso delle particelle elementari. Le curve segnate sono indicative della casualità degli spostamenti a causa dell'estrema leggerezza delle particelle di liquido.

Possibili percorsi dei droplet

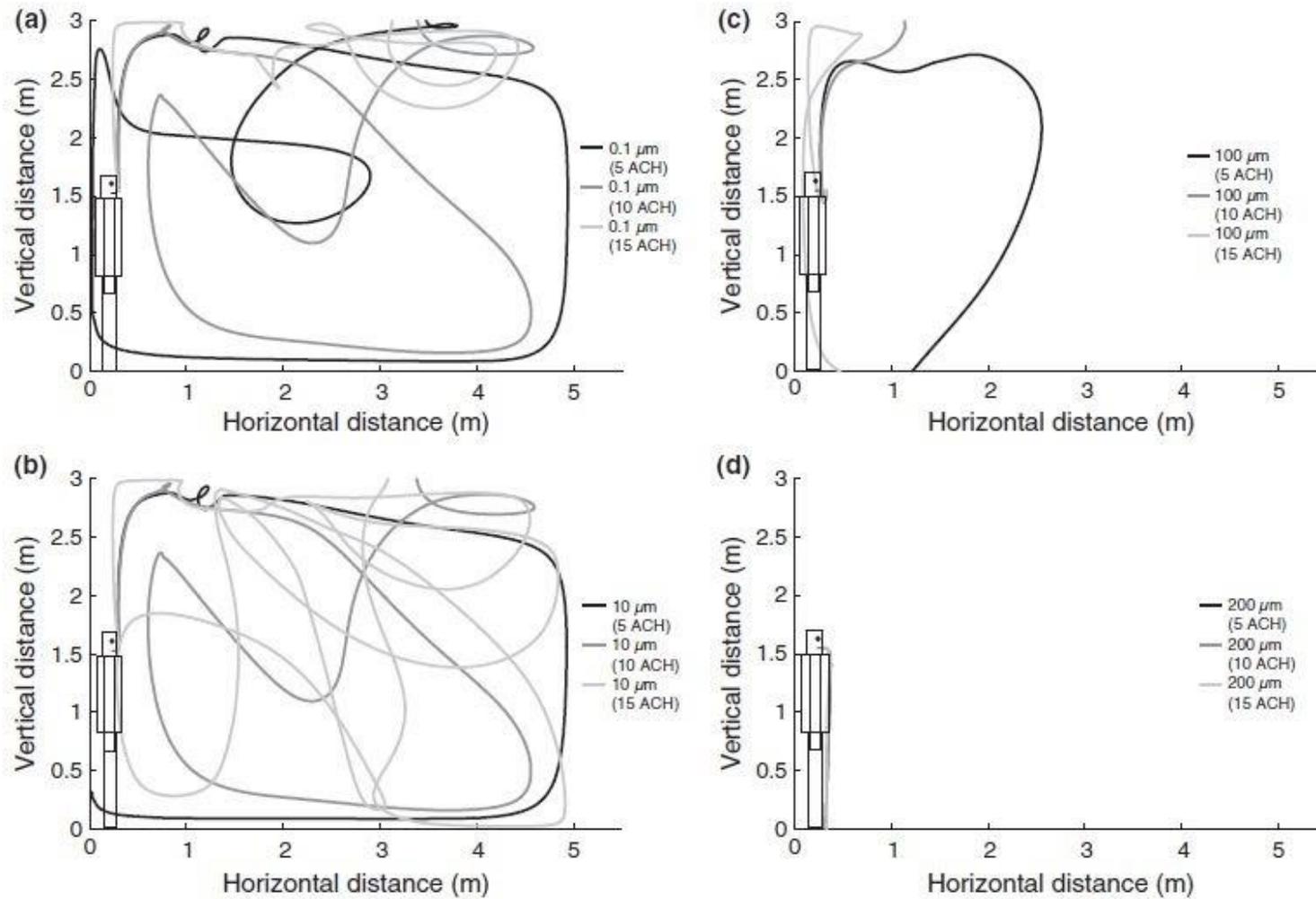


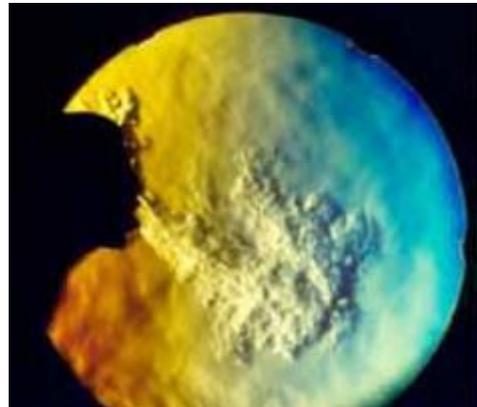
Fig. 7 Comparison of trajectories of droplets at different ventilation rates. (a) initial diameter 0.1 μm , (b) initial diameter 10 μm , (c) initial diameter 100 μm , (d) initial diameter 200 μm . $z = 2$ m

Meccanismi di trasmissione della COVID 19

Per contagiarsi occorre essere assorbiti da una **carica virale di un migliaio di virus** che non si propaga autonomamente in aria ma vive all'interno di gocce di *liquido organico*, **droplet**, emesse dall'uomo tramite i seguenti meccanismi:

1. **Respirazione**: produce fra **5 e 5000 droplet** con velocità bassa di **2-4 m/s**. Questi droplet hanno una bassa carica virale e quasi sempre si depositano a terra;
2. **Starnuto**: produce circa **30.000 droplet** ad una velocità che può raggiungere **60-80 m/s**. Le goccioline sono di solito più piccole rispetto a quelle emesse con la tosse e possono raggiungere distanze maggiori, oltre i 6 metri, con grande probabilità di contagio;
3. **Tosse**: un colpo di tosse può fare emettere fino a **200 milioni di droplet** ad una velocità di circa **20-40 m/s** e capaci di raggiungere distanze di **diversi metri** dal punto di emissione. Le gocce più pesanti ricadono al suolo mentre quelle più leggere rimangono in aria e possono facilmente infettare altre persone;

Quindi i colpi di **tosse** possono produrre fino a **200 milioni di particelle virali** e le velocità di spostamento dei **droplet** è sempre di alcuni ordini di grandezza **superiore** alla velocità di **0.1-0.3 m/s** dell'aria distribuita dagli impianti (vedi **UNI 10390**).

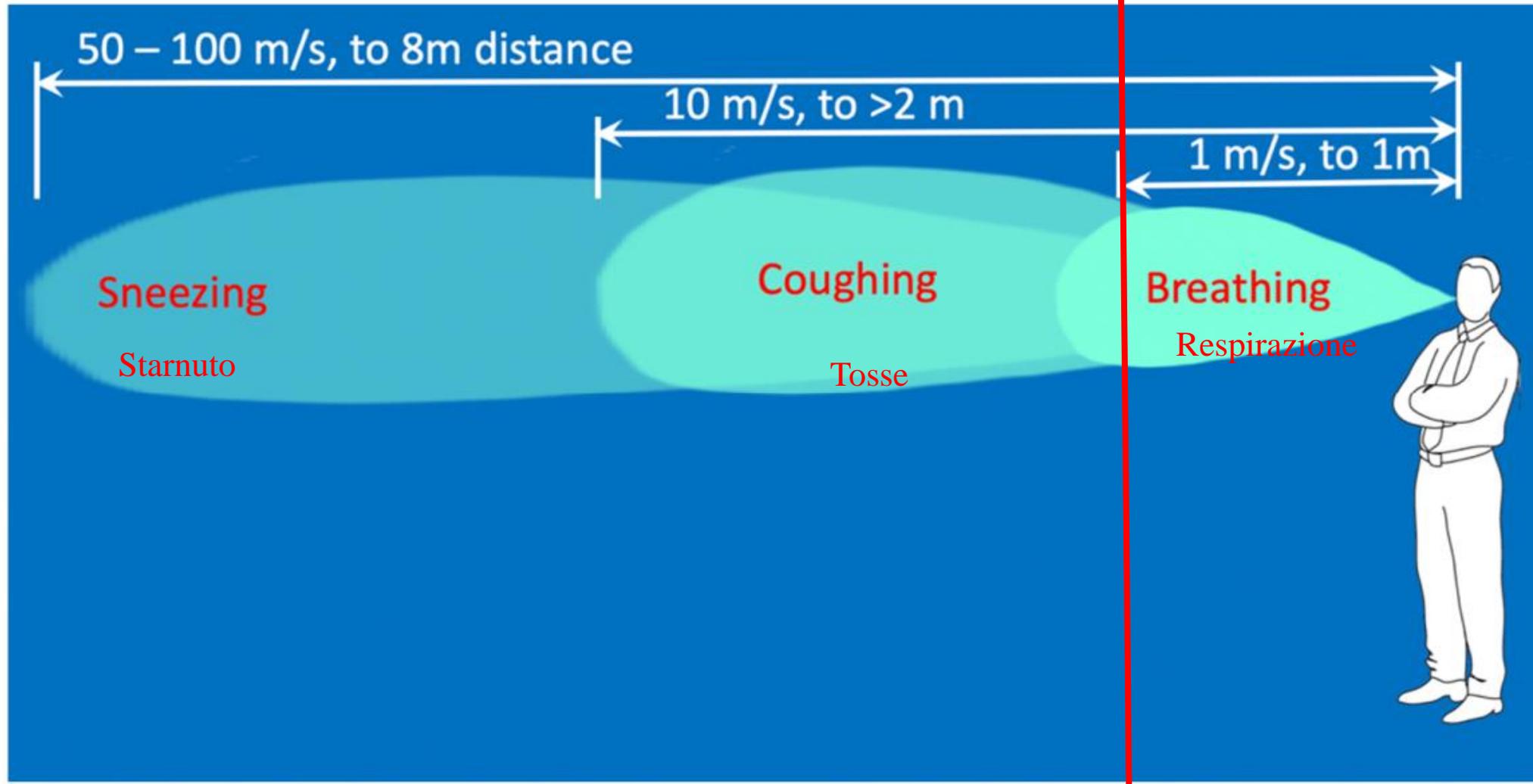


Meccanismi di trasmissione della COVID 19

In figura si ha una rappresentazione schematica delle **distanze medie** percorse dai **droplet** e delle **velocità medie** di uscita dalla bocca o dal naso.

Contagio a grande distanza

Limite di sicurezza consigliato dalle attuali norme
Contagio a breve distanza



Contagiosità dei Droplet

Sono state determinate le percentuali di contagio dovuta ai **droplet** di varie dimensioni.

Lindsley ha verificato che le percentuali di provenienza del **virus dell'influenza** da una persona infetta che **tossisce** si ha:

- **42%** da droplet con dimensioni $< 1 \mu\text{m}$;
- **23%** da droplet con dimensioni fra **1 e 4 μm** ;
- **35%** da droplet con dimensioni $> 4 \mu\text{m}$.

Una particella da **1 μm** di diametro pesa circa **8 ng**, quindi leggerissima. Pertanto, particelle di quest'ordine di grandezza rimangono sospese in aria per tempi lunghi e possono essere trasportate a lunga distanza da qualunque corrente d'aria all'interno degli ambienti.

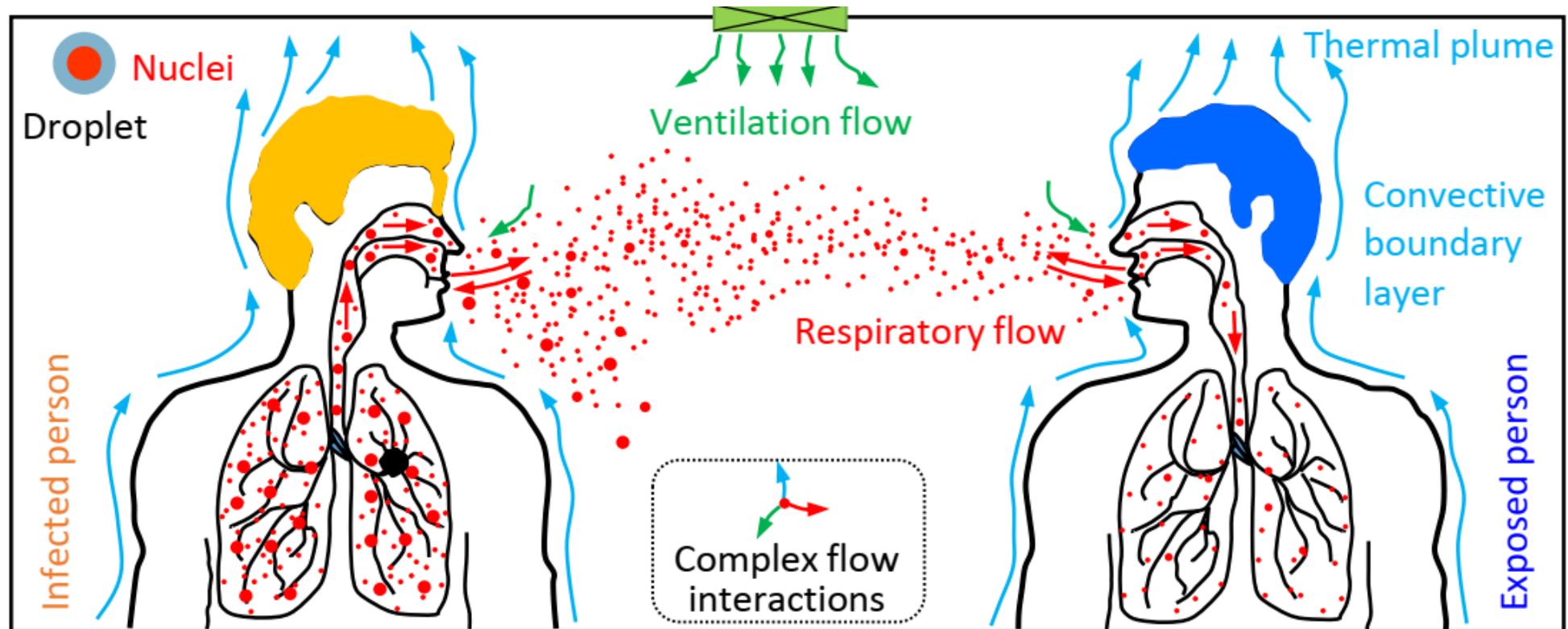
La presenza di una persona adulta in condizione di riposo comporta una potenza termica di circa **116 W** con una temperatura superficiale, funzione del vestiario e della temperatura dell'aria interna, che possiamo ritenere di almeno **36.5 °C** per una persona sana.

La presenza delle persone all'interno degli ambienti crea, pertanto, dei **pennacchi termici** che alimentano **moti convettivi a bassa velocità** capaci di far trasportare i droplet più leggeri anche a distanze di qualche metro.

Schematizzazione del contagio da droplet

In figura si ha una **schematizzazione del contagio tramite droplet (a breve distanza)** dovuto alle emissioni **respiratorie**, al flusso d'aria all'interno dell'ambiente e dai **pennacchi termici** creati dal calore emesso dalle persone.

La presenza di un **impianto di ventilazione** (o di climatizzazione) potrebbe influenzare il meccanismo dei contagi per trasmissione aerea se mal realizzato, come si dimostrerà più avanti. I movimenti convettivi generati dai **pennacchi termici** favoriscono l'immissione di inquinanti e **droplet** all'interno della zona espositiva delle persone favorendo il contagio attraverso le vie respiratorie, le mucose nasali e attraverso gli occhi.



Schematizzazione del contagio da droplet

L'attività di **respirazione** dipende dall'attività fisica svolta e dalle condizioni psicofisiche dei soggetti e pertanto non si hanno regole precise per quantificarla.

Abbiamo visto che, oltre alla respirazione, si hanno altre cause di emissione di **droplet** quale i **colpi di tosse**, gli **starnuti**, il **parlare** (sia a **bassa voce** che, ancora di più, **ad alta voce**). Ciascuno di questi meccanismi produce numerosi **droplet** incrementando la probabilità di rischio di contagio.

Le emissioni tramite la **bocca** produce modelli di emissione delle goccioline diversi da quelli attraverso il **naso** (sia per **respirazione nasale** che per **starnuti**).

Il **contagio per via area** è molto complesso e dipende da numerosi fattori, quali, ad esempio:

- **Il tipo di emissione** (dalla *bocca*, dal *naso*);
- **Il tipo di evento** (*respirazione, tosse, starnuto, parlato*);
- **Postura e orientamento** della persona contagiata e della persona ricevente;
- **Movimento degli occupanti** in vicinanza delle persone;
- **Interazione dei flussi d'aria** sia naturali, compresi i *pennacchi termici*, che per effetto della ventilazione artificiale.

I locali ben ventilati riducono la probabilità di rischio di contagio rispetto ai locali privi di ventilazione o con scarsa ventilazione, come sarà ampiamente dimostrato nei capitoli seguenti. Naturalmente la **ventilazione forzata** va controllata e progettata secondo precisi criteri per massimizzare gli effetti protettivi.

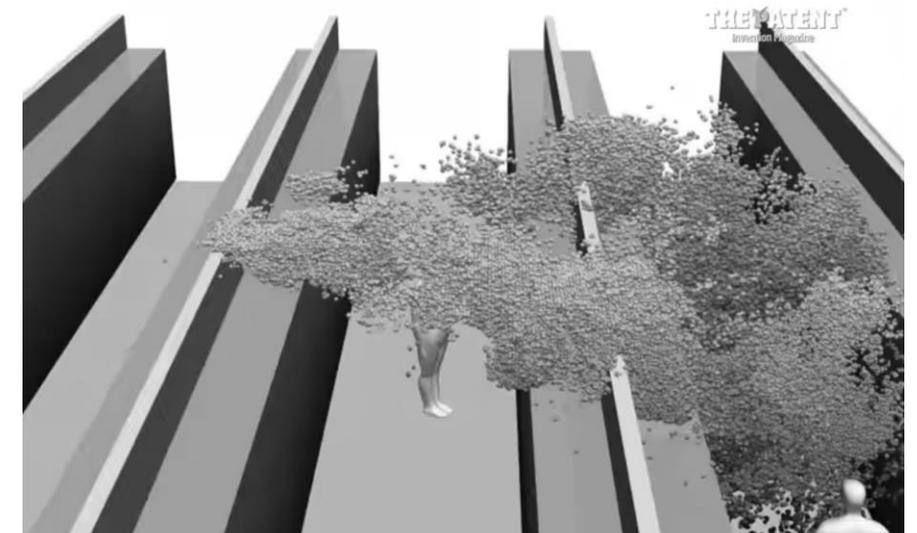
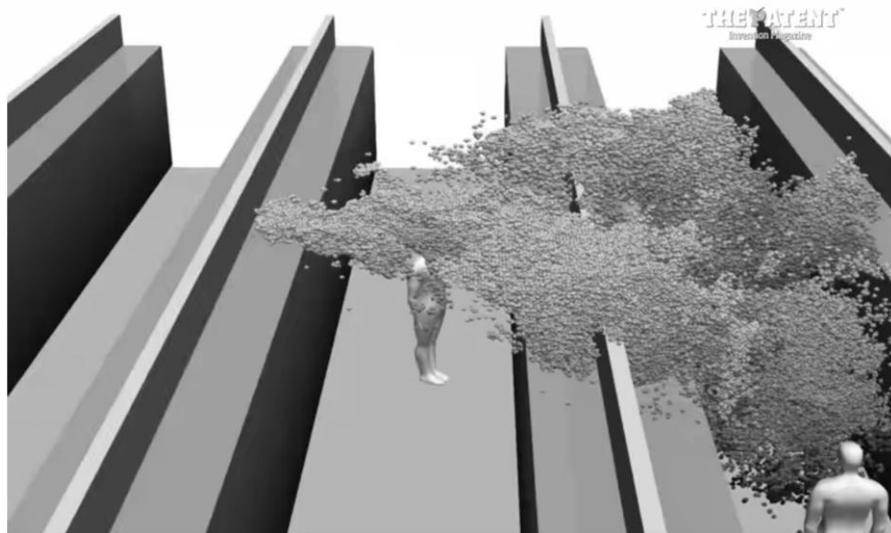
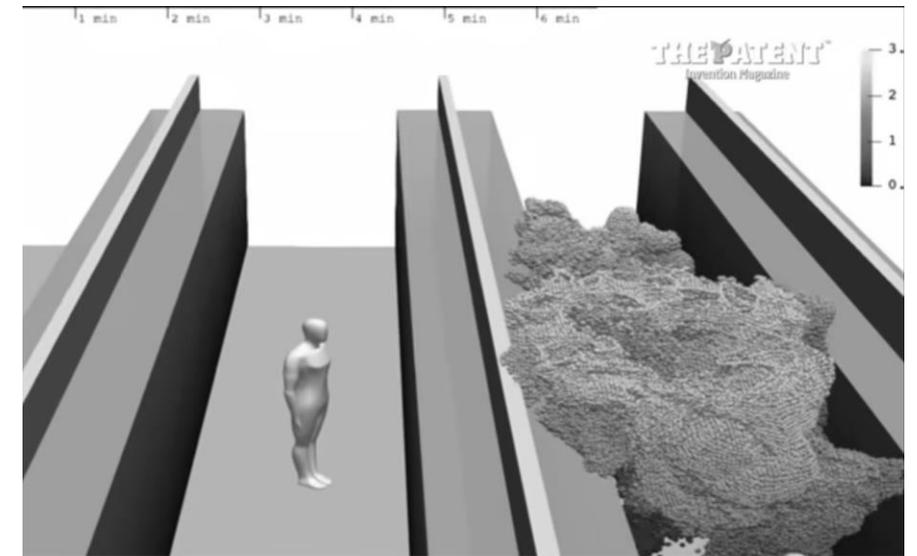
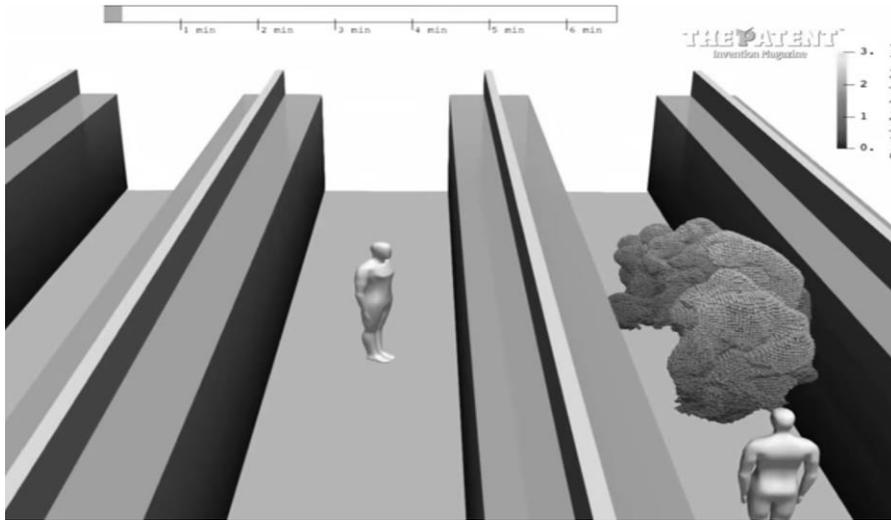
Meccanismi di trasmissione del COVID 19

Per la **tosse** e gli **starnuti** si ha la seguente tabella di **emissioni di droplet** (*Rapporto ISS n. 33/2020 del 25/05/2020*).

Diametro droplet in μm	Particelle emesse con uno starnuto	Particelle emesse con un colpo di tosse a bocca chiusa	Particelle emesse durante il parlato*
1-2	26000	50	1
2-4	160000	290	13
4-8	350000	970	52
8-16	280000	1600	78
16-24	97000	870	40
24-32	37000	420	24
32-40	17000	240	12
40-50	9000	110	6
50-75	10000	140	7
75-100	4500	85	5
100-125	2500	48	4
125-150	1800	38	3
150-200	2000	35	2
200-250	1400	29	1
250-500	2100	34	3
500-1000	1000	12	1
1000-2000	140	2	0

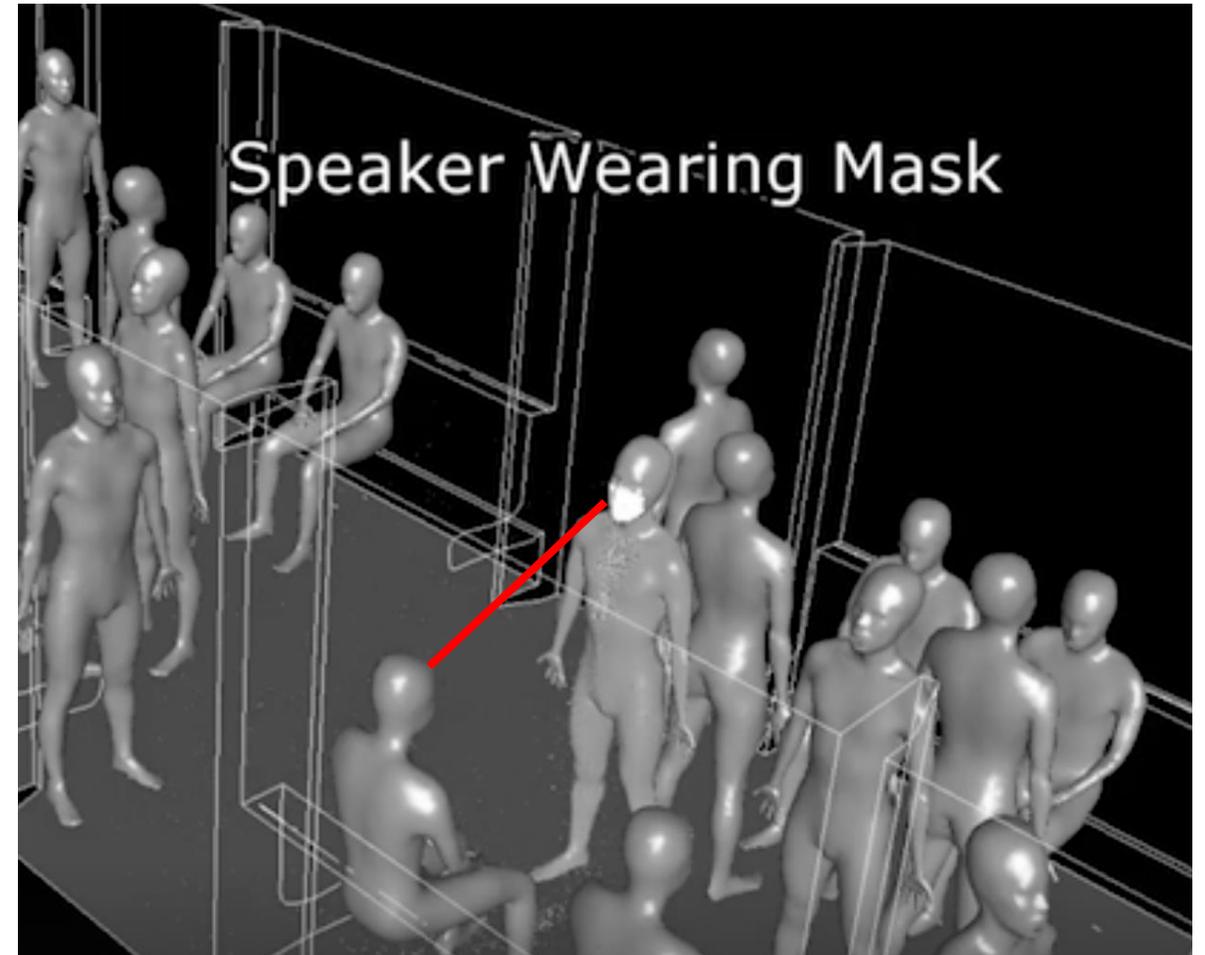
Meccanismi di trasmissione della COVID 19 – Colpi di tosse

Un semplice colpo di **tosse** di un infetto in un **supermercato** può facilmente infettare più corridoi paralleli, come si può osservare nella simulazione seguente.



Meccanismi di trasmissione della COVID 19 – Autobus

In un mezzo di trasporto pubblico si ha una grande facilità di trasmissione del virus, specialmente se il soggetto infetto non utilizza la mascherina di protezione individuale. Questo è un problema fondamentale per le autorizzazioni all'uso dei mezzi di trasporto pubblici.

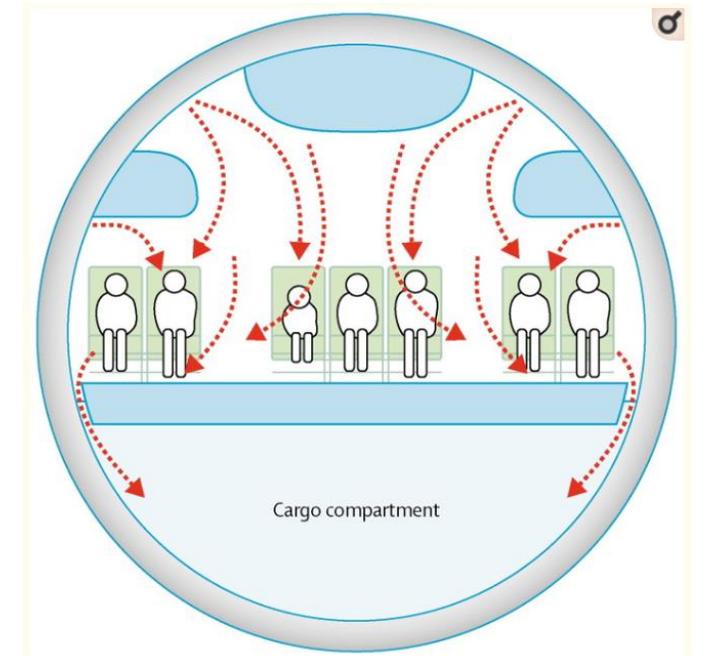
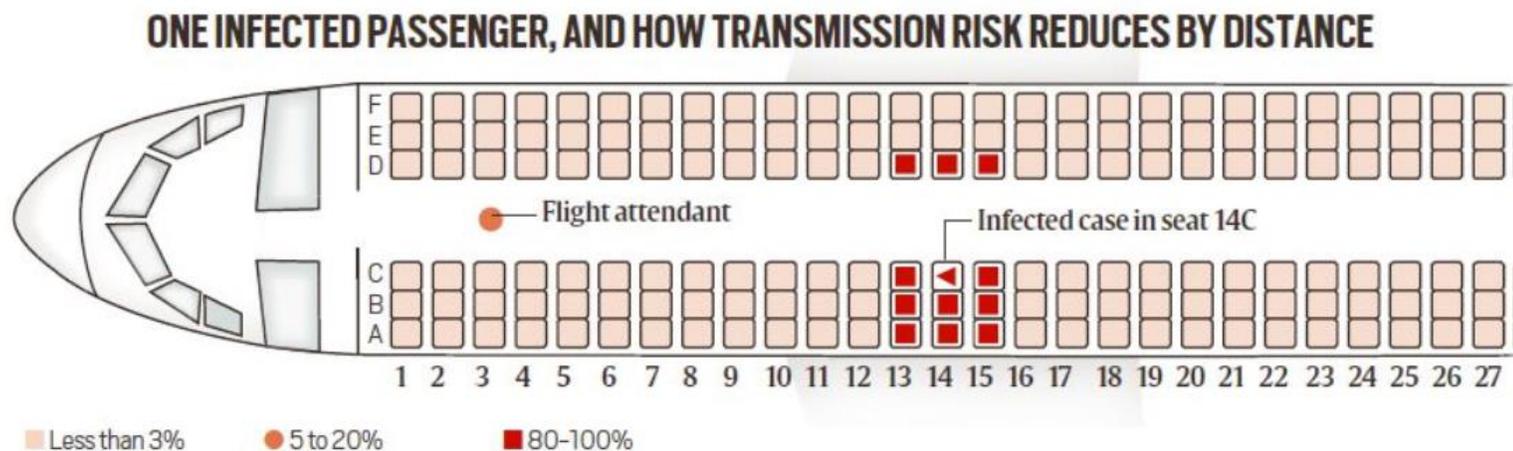


Meccanismi di trasmissione della COVID 19 – Aereo

Negli **aerei** la trasmissione del contagio è elevata grazie anche al sistema di ventilazione normalmente adottato dai costruttori e alla **ridotta distanza** fra i passeggeri.

I costruttori stanno progettando e realizzando **nuovi sistemi di ventilazione personalizzata** con emissione in corrispondenza delle singole poltrone (*mini dislocamento*) in modo da ridurre gli effetti di ricircolo. Inoltre si stanno inserendo **filtri HEPA ad alta efficienza** (99,97%, fino a 10 nm) e **lampade U.V.** per inertizzare i virus.

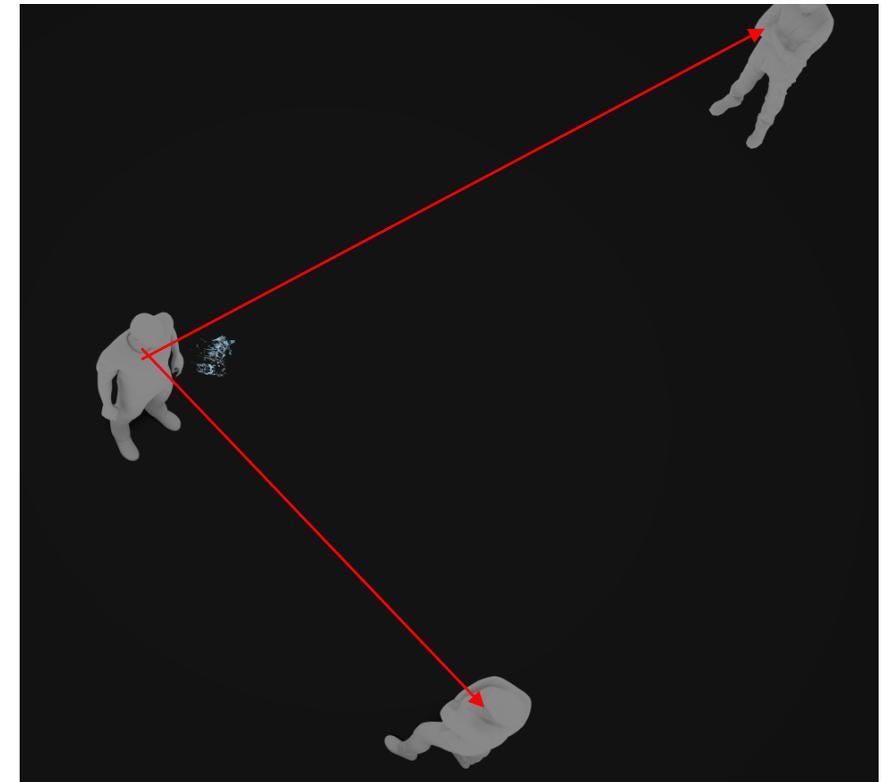
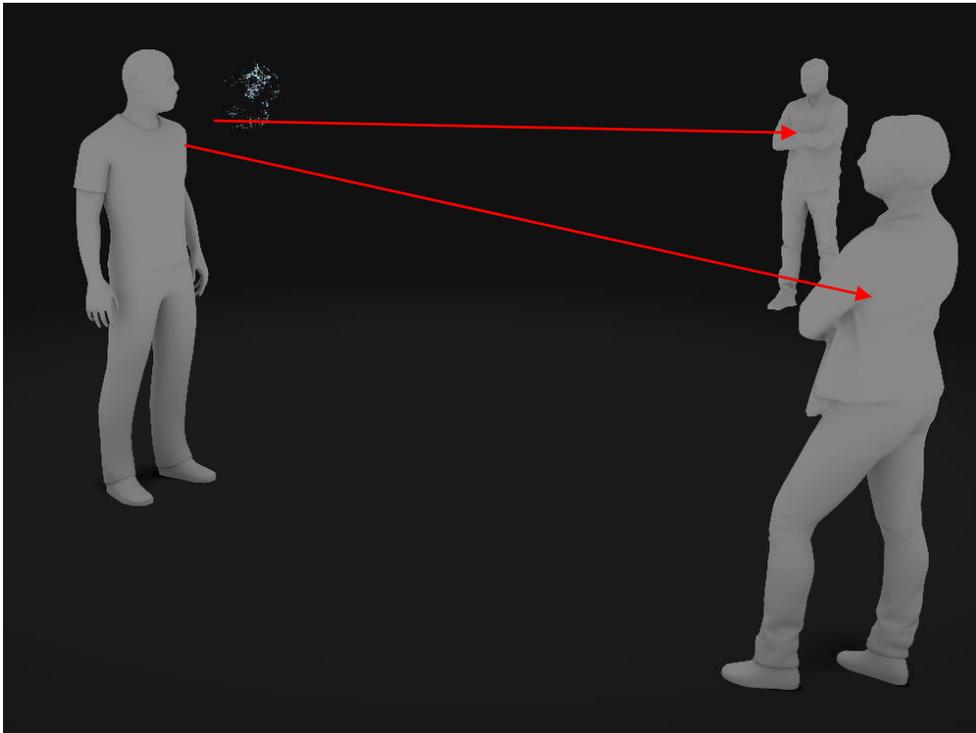
Nei nuovi vettori il **ricambio dell'aria è incrementato** in modo da avere un ricambio totale ogni 20-30 minuti. L'aria della cabina è di norma miscelata con l'aria prelevata dall'esterno attraverso le prese del motore così da controllare la temperatura e l'umidità all'interno della cabina. In questo modo il rischio di contagio è limitato al problema della **breve distanza**, per respirazione e parlato. La **rimozione dell'aerosol** è effettuato dal sistema di ventilazione con mandata dall'alto e ripresa dal basso.



Meccanismi di trasmissione del COVID 19 – Simulazione 3D

In un gruppo di persone la massa di **droplet** emessa da un singolo infetto raggiunge facilmente le altre persone presenti per effetto delle velocità propria dei **droplet** emessi (specialmente per i colpi di **tosse** e di **starnuti**). Si ricordi che:

- **le persone infette non si distinguono dalle altre, non solo colorate e non hanno segni distintivi che facciano pensare alla malattia.**
- **a queste difficoltà si aggiungono gli asintomatici che si spostano liberamente ovunque provocando un gran numero di infetti.**



Meccanismi di trasmissione della COVID 19

Come già osservato, i **droplet** emessi **evaporano velocemente** formando dei nuclei molto piccoli e carichi di virus che restano in sospensione in aria per un periodo di tempo non lungo. Per questo è **più difficile rimanere contagiati se si permane per poco tempo in un ambiente** (qualche decina di minuti).

Inoltre, è difficile stabilire quante persone siano contagiate **respirando** i **droplet**, rispetto a quelle contagiate indirettamente **toccando superfici contaminate** e poi portando le mani alla faccia, e in particolare sulla bocca, sul naso o sugli occhi.

Con la **respirazione** produciamo tra i **50 e 5000 droplet** a velocità molto inferiori rispetto a quelli prodotti con **tosse e starnuti**. Questi ultimi ricadono rapidamente a terra, senza rimanere in sospensione.

Con l'**espirazione non espelliamo quantità significative di materiale dalle vie respiratorie** profonde, dove si accumulano le maggiori riserve del coronavirus. La carica virale dei respiri è quindi molto bassa.

Il rischio di contagio è maggiore in presenza di colpi di tosse e di starnuti che producono, con un solo colpo, **centinaia di migliaia o di milioni di cariche virali** e quindi è facile ricevere quantità di virus tali da costituire una carica virale necessaria al contagio.

In spazi chiusi la presenza di una persona infetta che **tossisce** o **starnutisce** costituisce un pericolo serio di propagazione del contagio in tempi ridotti (**pochi minuti**). **Nel caso di semplice respirazione occorre almeno un'ora per assorbire le cariche virali necessarie al contagio.**

Meccanismi di trasmissione della COVID 19 – Ambienti chiusi

Nei **luoghi di lavoro al chiuso** il rischio di contagio, anche senza tosse o starnuti, aumenta perché oltre alla normale respirazione si ha un incremento di emissione di **droplet** per il **parlato** e per le **attività fisiche** svolte. Per il parlato si emettono fino a **10 volte** in più droplet (circa **200 al minuto**) rispetto alla normale respirazione e quindi cresce il numero di cariche virali prodotte. **Si può avere il contagio restando almeno 10 minuti nella sala di lavoro.**

Questo rischio aumenta se invece di parlare normalmente si **parla ad alta voce** perché si emette un numero di droplet ancora maggiore (alcune migliaia al minuto) e quindi il rischio di contagio scende a **qualche minuto di presenza**. Il fenomeno è stato osservato in alcuni macelli dove, per la presenza di forti rumori ambientali, il personale era costretto a parlare ad alta voce per farsi ascoltare. Si ha anche un caso di contagio in un coro musicale negli USA.

Per valutare il rischio di contagio in locali di lavoro al chiuso occorre, quindi, considerare il **tipo di attività** (solo *respirazione, parlato normale, parlato ad alta voce*) e il **tempo di permanenza** nel locale. I rischi di contagio possono cambiare anche in modo sostanziale se i locali sono ben aerati con portate d'aria elevate e, in alcuni casi, senza il **ricircolo** interno se questo contribuisce a diffondere i droplet e gli aerosol. In quest'ultimo caso, anche filtrando l'aria interna con filtri ad alta efficienza, si temono effetti di accumulo della carica virale con un incremento del rischio di contagio. Questa tesi, tuttavia, è oggi contestata dagli impiantisti che sostengono la tesi opposta, cioè che una filtrazione ad alta efficienza riesca a ridurre il rischio di contagio. I contagi sono più frequenti al chiuso, cioè in casa, al lavoro in ambienti chiusi, sui mezzi di trasporto, nei bar e ristoranti, nelle palestre chiuse. Gli **ambienti aperti presentano rischi minori** perché sono ventilati.

Meccanismi di trasmissione della COVID 19

Melikov e Krikor, 2020, hanno presentato uno studio molto dettagliato sulla diffusione di droplet nuclei per respirazione all'interno degli ambienti.

Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: a review

Ai, Z.T.; Melikov, Arsen Krikor

Published in:
Indoor Air

Link to article, DOI:
[10.1111/ina.12465](https://doi.org/10.1111/ina.12465)

Publication date:
2018

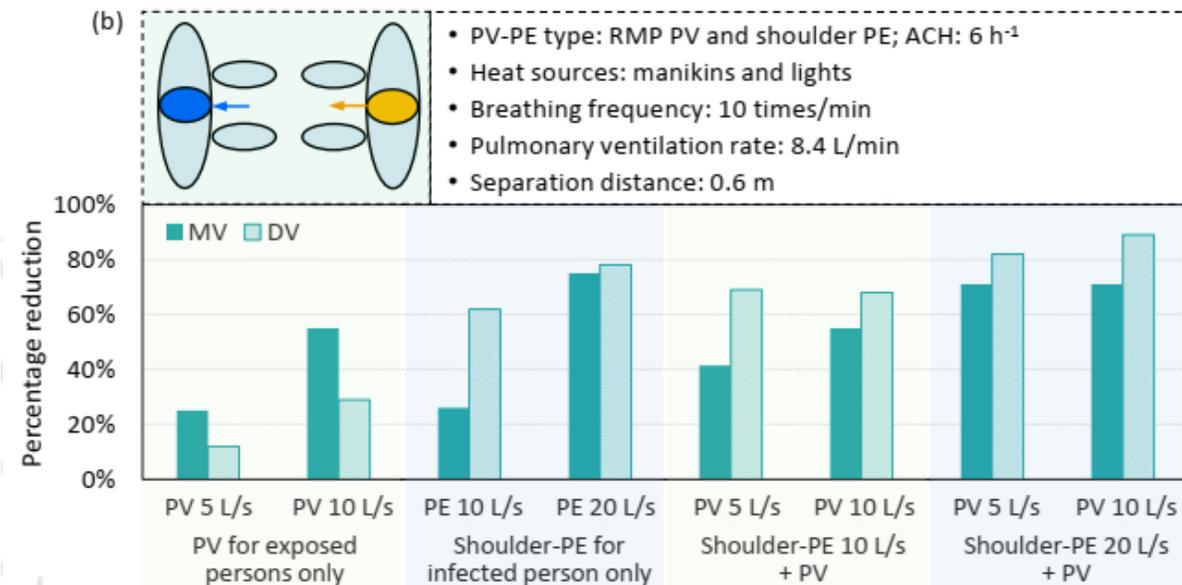
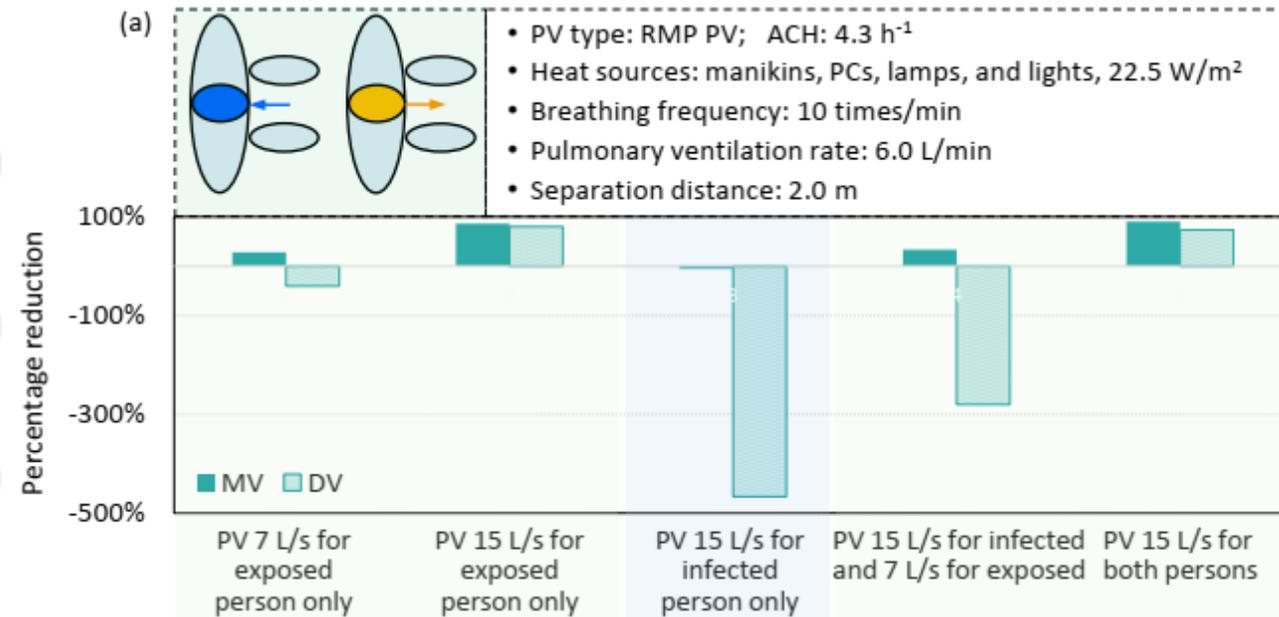
Document Version
Peer reviewed version

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Ai, Z. T., & Melikov, A. K. (2018). Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: a review. *Indoor Air*, 28(4), 500-524. <https://doi.org/10.1111/ina.12465>

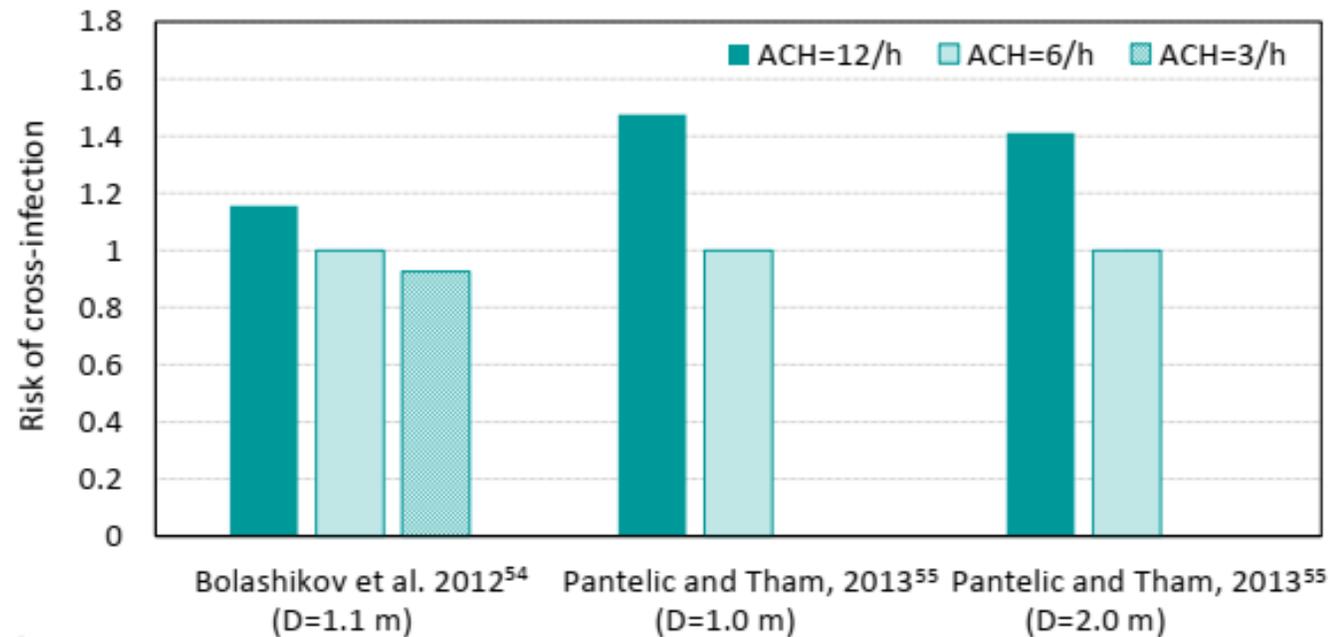
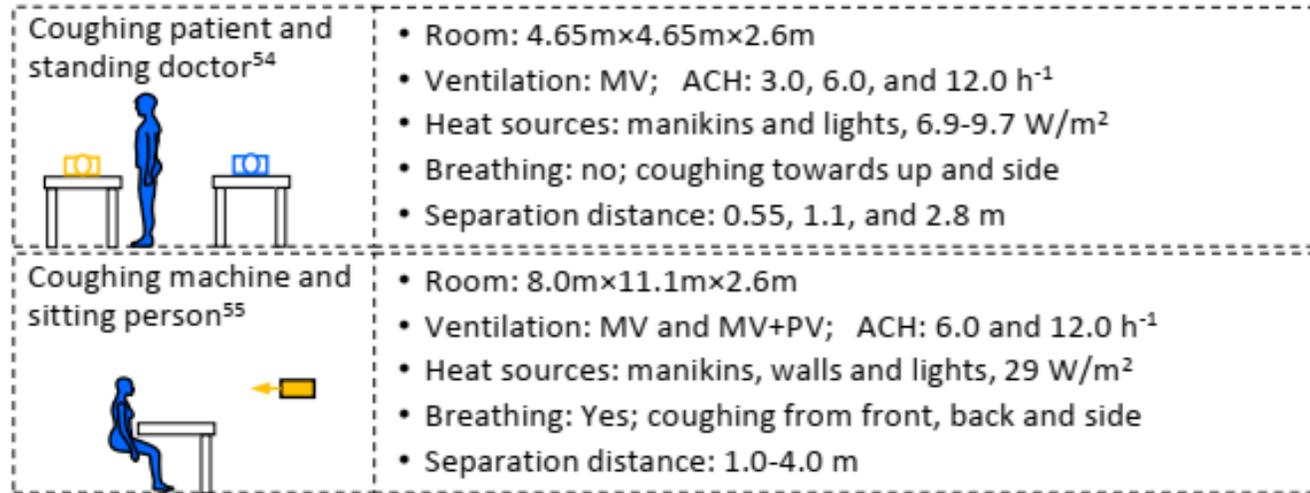
Meccanismi di trasmissione della COVID 19

In questo studio sono presentati numerosi casi di possibilità di contagio a **breve distanza** in situazioni di **contagiato-suscettibile** seduti, in piedi e in attività varie. Se ne presentano alcuni casi per avere l'idea della completezza dello lavoro svolto e per dimostrare come il contagio a **breve distanza** sia stato esaminato in ogni situazione possibile dai virologi.



Meccanismi di trasmissione della COVID 19

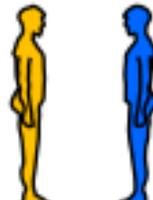
Influenza del numero di ricambi orari (ACH)



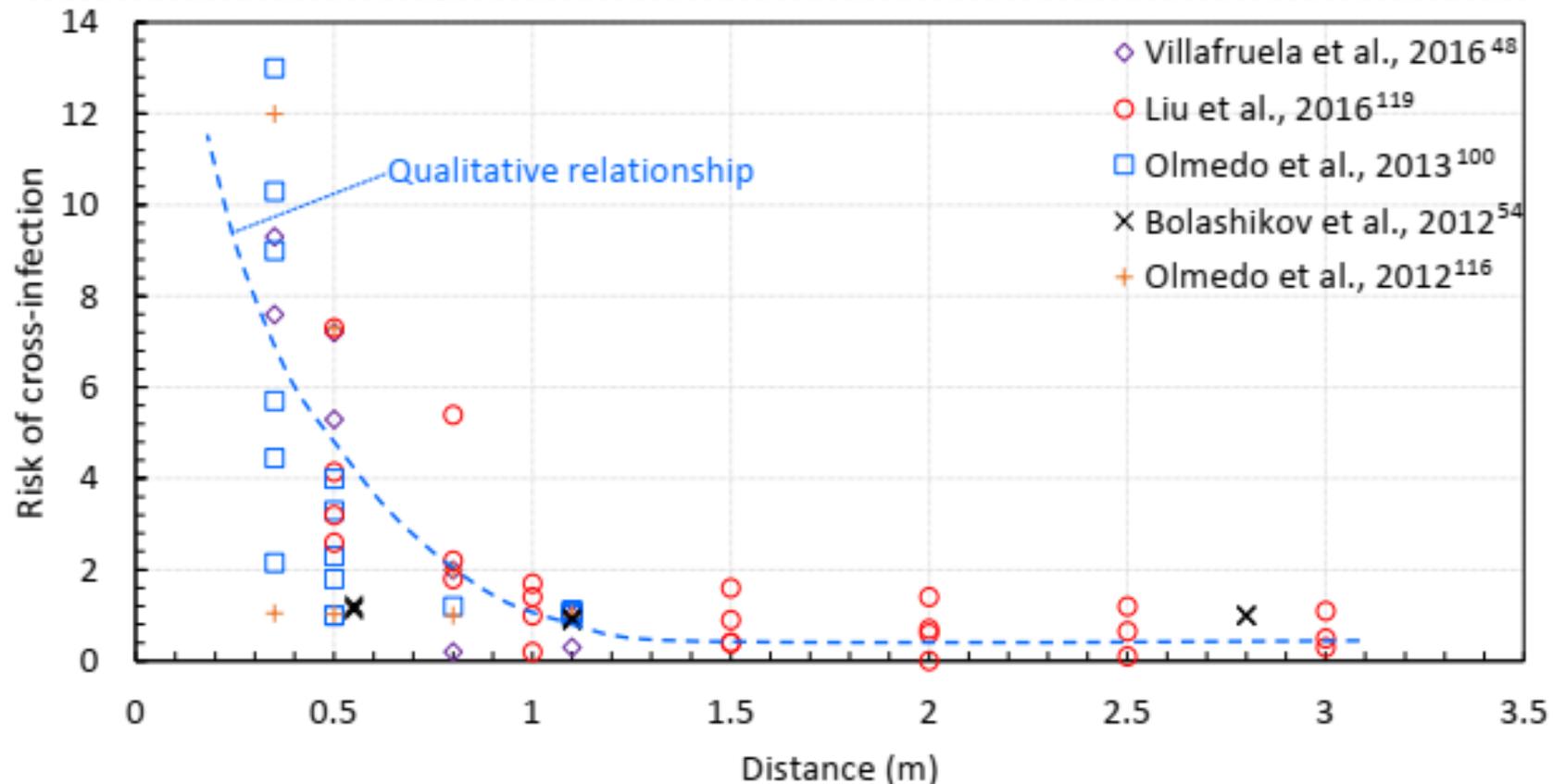
Meccanismi di trasmissione della COVID 19

Distanza di propagazione dei droplet all'interno di una stanza di 4.2 x 3.2 x 2.7 m

Major layout^{48,100,116,119}



- Room: 4.2m×3.2m×2.7m^{48,100,116,119}; ACH: 5.6 h⁻¹(^{48,100,116,119})
- Ventilation: DV^{48,116,119}; MV¹¹⁶; DnV¹⁰⁰;
- Layout: standing and face-to-face^{48,100,116,119}, face-to-back and -side¹¹⁶;
- For conditions in reference⁵⁴, see Figure 3



Meccanismi di trasmissione della COVID 19

Varie situazioni con soggetti seduti di fronte, di spalle o con inclinazioni varie

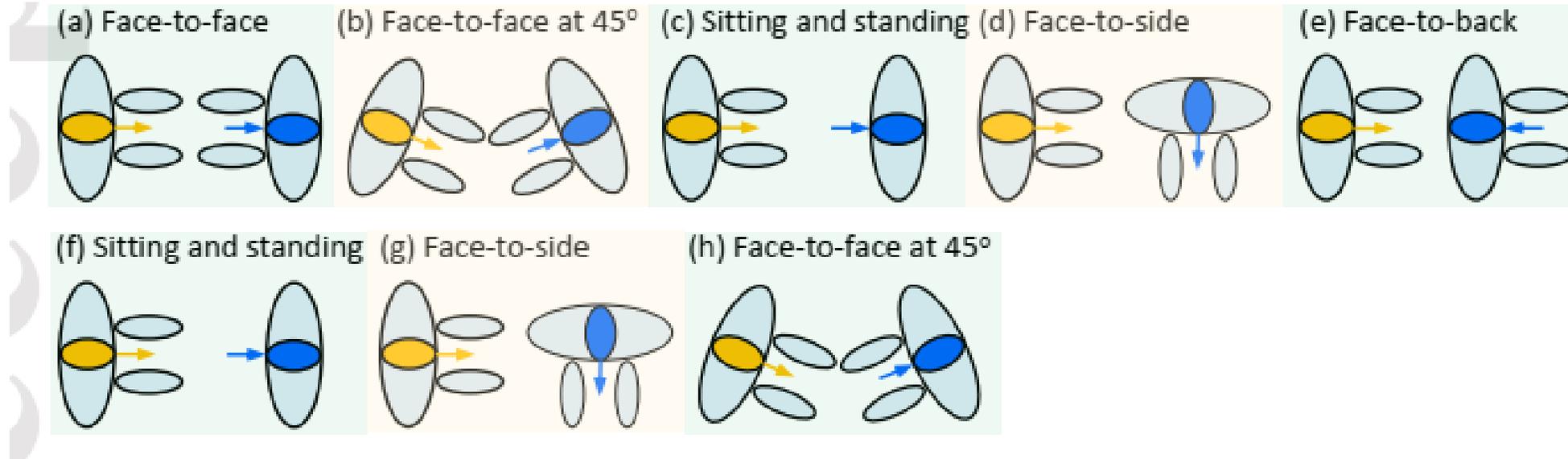
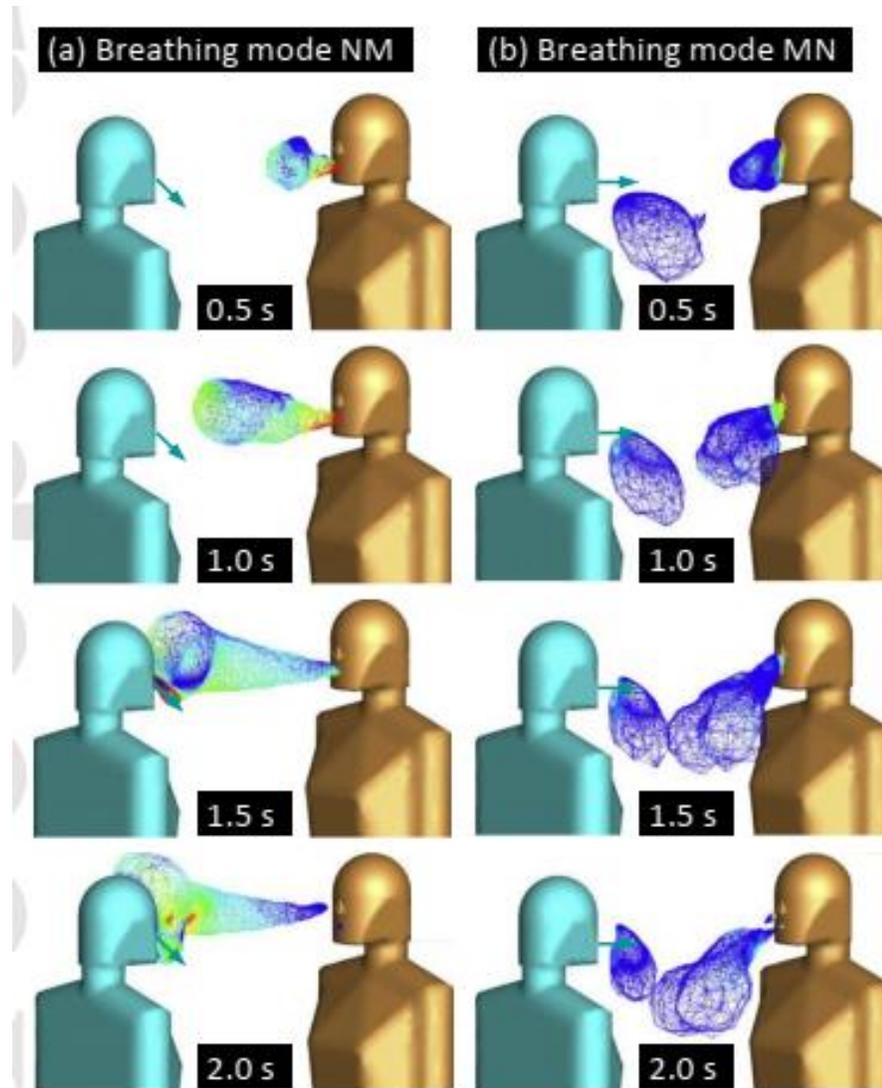


Figure 5 Influence of relative orientation and posture on cross-infection risk, where the cross-infection risk decreases from (a) to (e) when using $MV^{69,107,116}$ and from (f) to (h) when using DV^{107} ; note that the left-hand manikin represents the infected individual and the right-hand one the exposed individual.

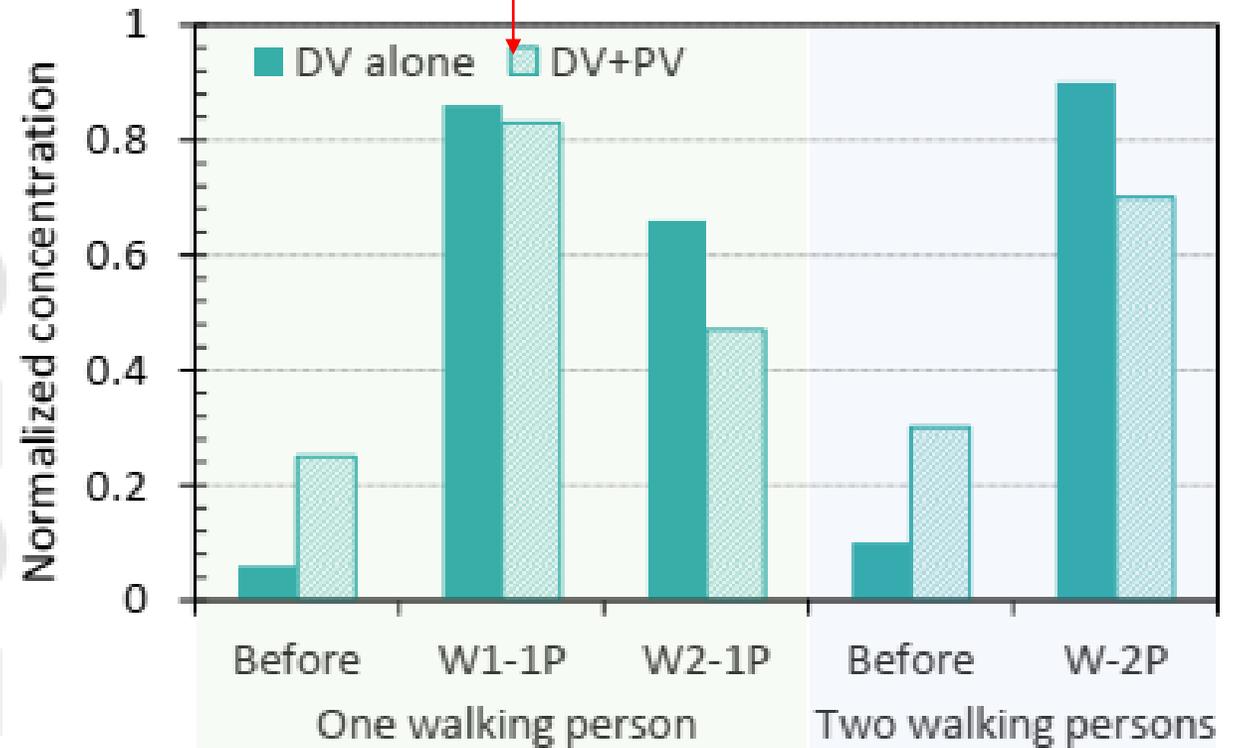
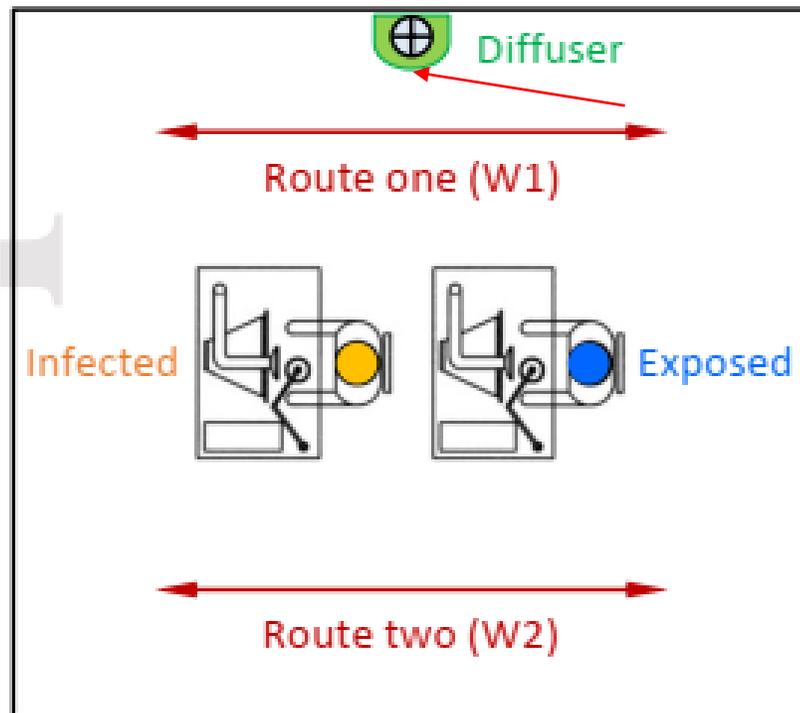
Meccanismi di trasmissione della COVID 19

Importanza della respirazione e le modalità di interazione fra soggetti che respirano e parlano contemporaneamente.



Meccanismi di trasmissione della COVID 19

Differenza di esposizione dovute al percorso in corsia in presenza di bocchette di mandata dell'aria condizionata. Il passaggio vicino alla bocchetta di mandata ha una maggiore probabilità di contagio. Questo consiglia una corretta disposizione delle bocchette in modo da essere lontane dai soggetti.



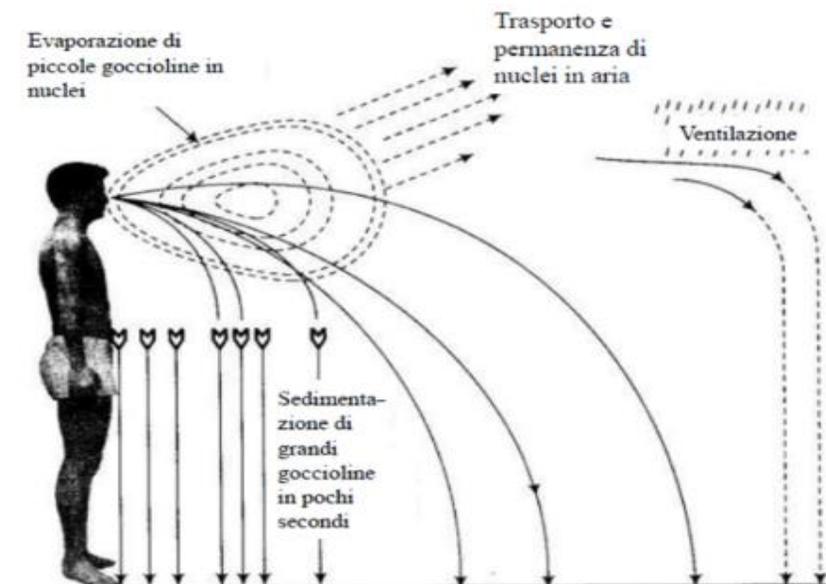
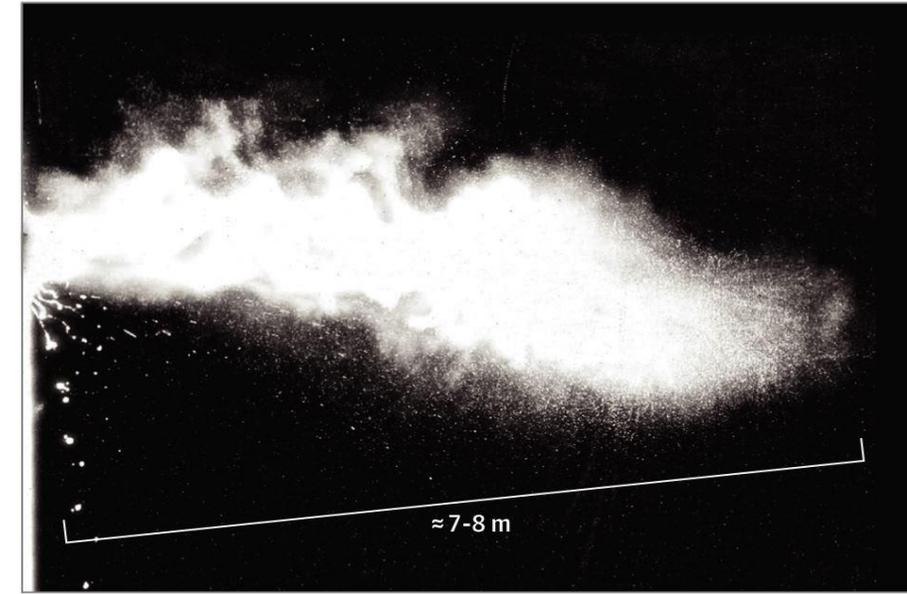
Limite dei 2 metri

Esiste un metodo di controllo più sicuro delle infezioni ampiamente diffuso: **fino a 2 metri di distanza** dal paziente c'è un rischio di contagio basso per i **droplet**.

L'idea che tutte le grandi goccioline cadano sul pavimento **entro 2 metri** sembra essere stata inizialmente proposta da **Walls**, sulla base di ipotesi successivamente messe in discussione e con dati empirici limitati (*Xie 2007*).

La maggior parte dei dati esistenti sembra confutare questa ipotesi. Ad esempio, uno studio recente ha considerato la **tosse** di 5 volontari dopo aver fatto gargarismi con coloranti alimentari e si è visto che c'era una **contaminazione macroscopica visibile oltre i 2 metri** di 4 partecipanti su 5. (*Loh 2020*).

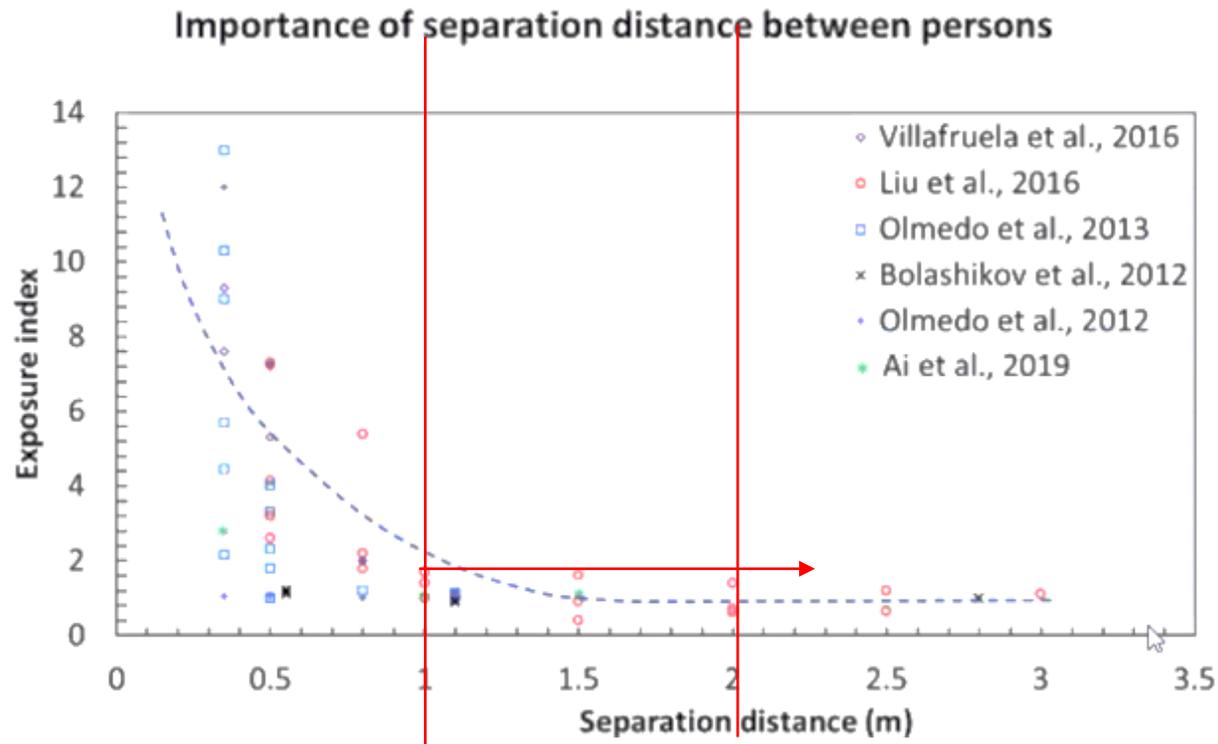
Semplici immagini di **starnuti** mostrano una nuvola di goccioline fino a **8 metri**. (*Bourouiba 2020*). In un altro studio, in assenza di procedure di generazione di aerosol, le cariche virali di *influenza* erano in realtà più lontane dal paziente, al di fuori della stanza del paziente. (*Cummings 2014*)



Limite dei 2 metri

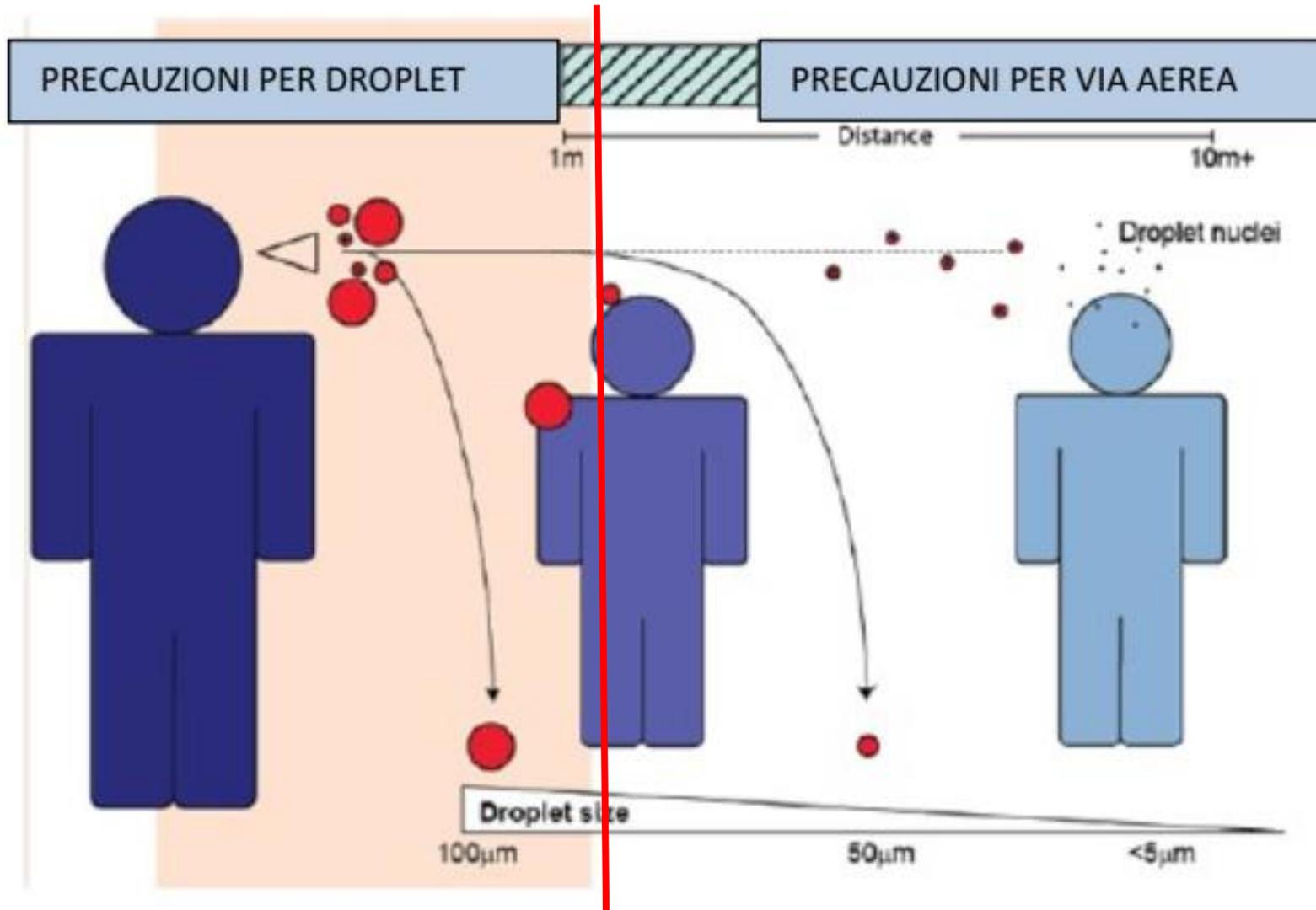
Non dovremmo fare affidamento sulla regola dei 2 metri per ritenerci perfettamente al sicuro. Poiché le goccioline si diffondono attraverso lo spazio tridimensionale, la concentrazione delle goccioline diminuisce in modo esponenziale man mano che si allontana dal paziente infetto. Nel complesso, più si è lontani dal paziente, più si è sicuri. È maggiormente probabile che si venga contaminati a 50 cm rispetto a 1 metro. Il rischio è inferiore a distanza di 2 metri, ma non scende a zero. Si è ancora più sicuri di 4 o 8 metri dal paziente (o meglio, dietro una porta chiusa).

Il rischio di contagio è molto piccolo oltre il limite di 2 metri fintanto che il paziente indossa una maschera, non tossisce o starnutisce attivamente e non è in corso una procedura di generazione di aerosol.

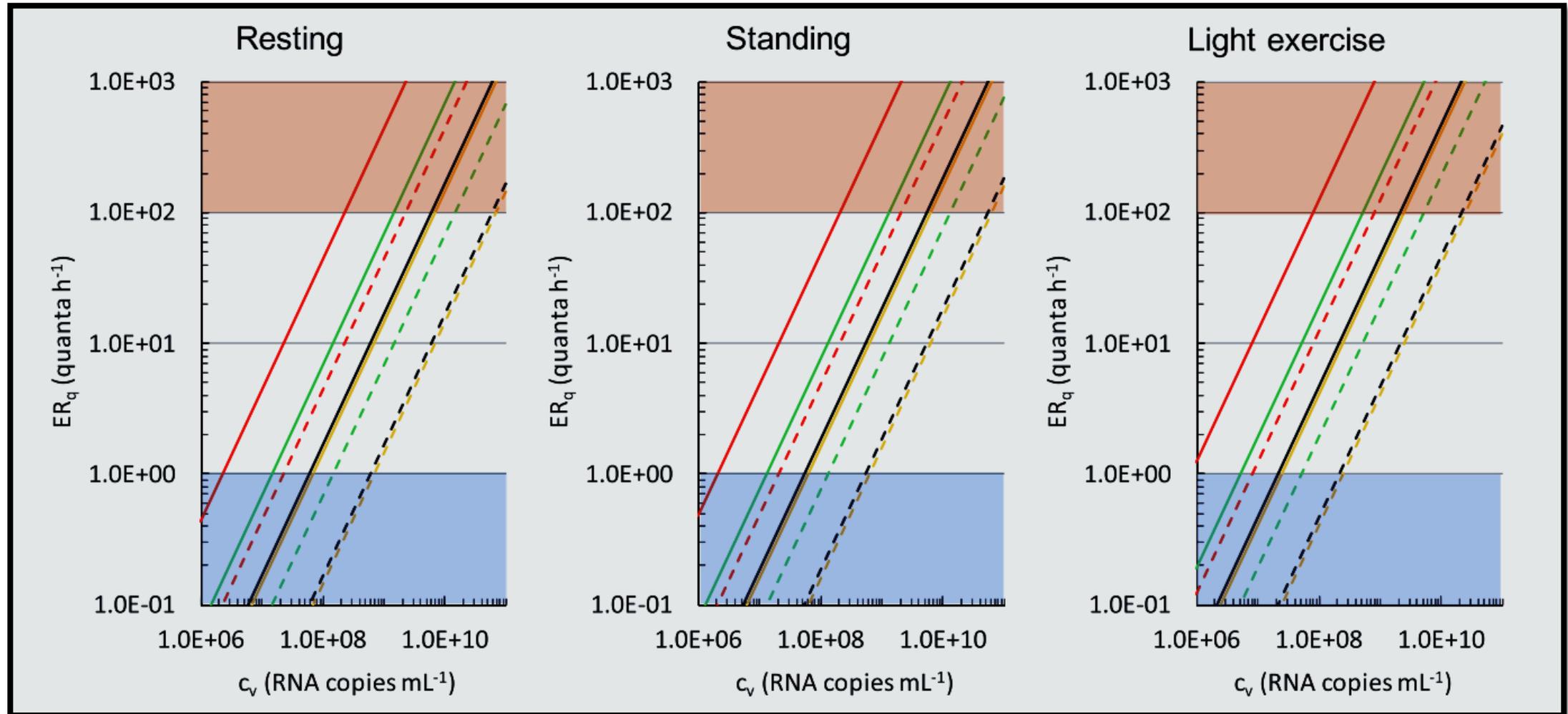


Limite dei 2 metri

In figura si può osservare come le distanze percorse dalle particelle dipendono molto dalle loro dimensioni: **le particelle più pesanti cadono a terra entro un metro, quelle più leggere possono arrivare ad una distanza di 8-10 m.**



PRODUZIONE DEI «QUANTA» NEGLI EDIFICI



Determinazione delle Cariche Virali

Il contagio da **SARS-CoV-2** sappiamo che non è determinato da una o poche unità virali ma occorre avere una quantità di virus di circa un migliaio di unità perché si possa avere il contagio.

Si è detto che le goccioline di liquido (**droplet**) emesse attraverso le vie respiratorie (bocca e naso) hanno in genere un numero di virus tale da costituire una **carica virale**.

La determinazione delle **cariche virali** non è semplice e dipende da una serie di fattori quali:

- *Le dimensioni dei droplet;*
- *Numero di copie RNA di virus trasportate;*
- *Attività svolta (respirazione, parlato, tosse, starnuto);*
- *Luogo di emissione delle goccioline (bocca o naso);*
- *Topologia di emissione in relazione al soggetto infetto e i soggetti **suscettibili di infezione**.*

Oltre al problema della determinazione delle cariche virali si ha anche quello di determinare il numero di cariche virali emesse ogni ora, dette **quanta di emissione oraria**.

Questa grandezza, difficile da determinare *a priori*, è alla base di tutti i calcoli sul **rischio di contagio** con gli impianti di ventilazione e/o di climatizzazione in genere.

Sono disponibili molti dati per trasmissioni aeree per l'*influenza*, la *SARS*, la *tubercolosi* (anche se questa è provocata dal *bacillo di Koch*), per il *morbillo*. Sono ancora pochi i dati per il virus **SARS-CoV-2** e, soprattutto, si hanno continui aggiornamenti sulle sue modalità di infezione.

I Quanta di infezione virale

Si vedrà nei prossimi capitoli che il calcolo della probabilità di contagio viene effettuato mediante una grandezza apparentemente slegata ai singoli patogeni: i **quanta di infezione virale**.

Si tratta di un concetto importante perché i **quanta** non rappresentano un'unità fisica ma una un'**unità di dose, D63**, che viene calcolata mediante studi epidemiologici.

I **quanta** sono definiti come **il numero di particelle infettive (patogeni) capace di infettare il 63% dei soggetti suscettibili**. In questa definizione sono compresi due fenomeni biologici:

1. il **numero di particelle patogene**;
2. L'**infettività delle particelle** (che comprende la **capacità di cattura** delle particelle di determinate dimensioni e la **probabilità di deposizione** in regioni appropriate dell'apparato respiratorio);

In definitiva, i **quanta** tengono conto **non solo del numero delle particelle necessarie per il contagio ma anche dei meccanismi biologici per provocare l'infezione**.

Questo concetto è assai importante per i virus, in particolare il **SARS-CoV-2**, perché, diversamente da quanto avviene per le cariche batteriche della **tubercolosi** (che provocano sempre un contagio) le cariche virali **provocano contagio solo in determinate condizioni** (dimensioni fisiche, numero delle cariche virali, zona dell'apparato respiratorio interessata,).

Si utilizzerà la produzione oraria dei **quanta (quanta/h)** nei calcoli futuri.

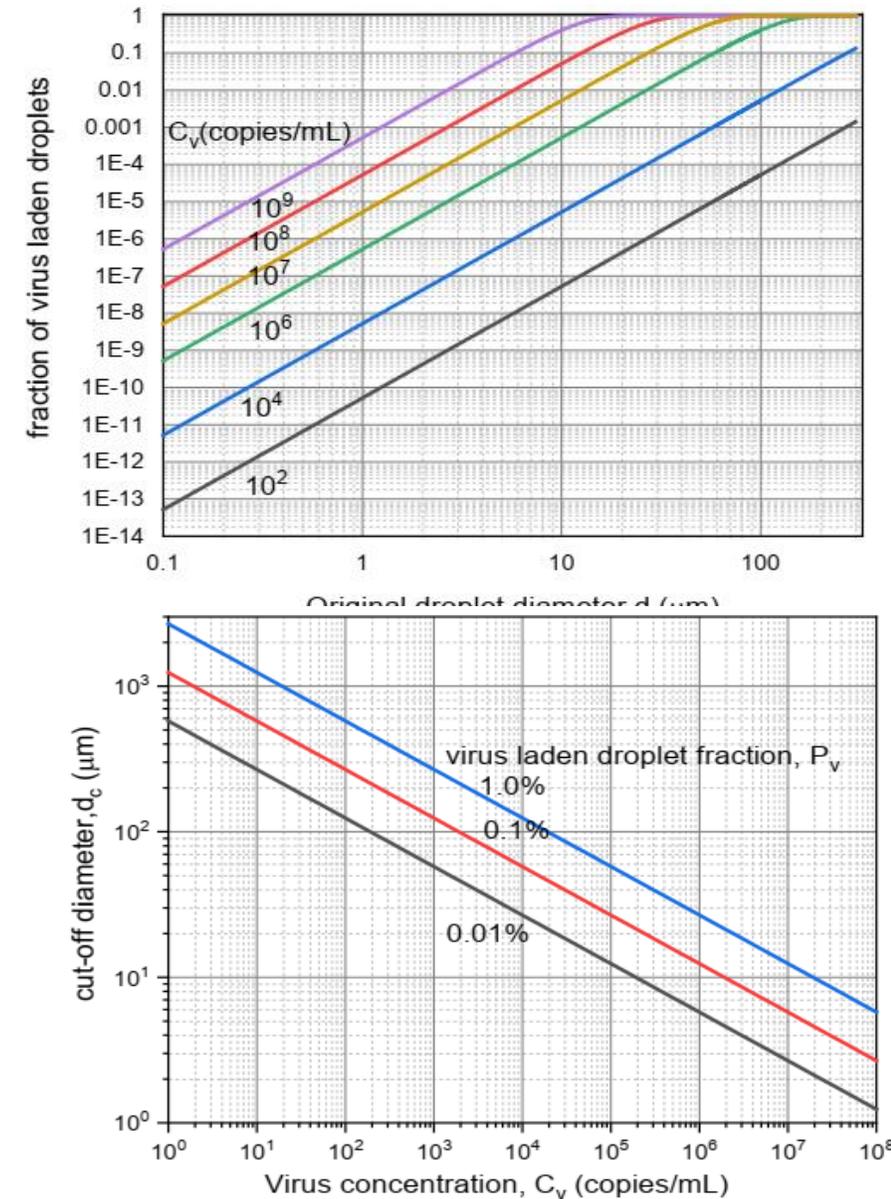
Frazione di virus trasportata nei droplet

La figura mostra la variazione della **frazione di goccioline di virus cariche (virusol)** rispetto al diametro delle goccioline emesse per differenti cariche virale, (*Stadnytskyi* e altri).

La relazione tra il carico virale e la gravità della malattia è di notevole interesse pratico. In un recente studio di *Liu* e altri sono stati trovati **casi gravi con carica virale nettamente maggiore rispetto ai casi più lievi**.

Per carichi virali inferiori a 10^4 copie/mL di RNA, previsti per lo più da casi lievi e moderati, la frazione di **virusol** è inferiore allo **0,1%** per le goccioline inferiori **60 μm** ; vale a dire che oltre il 99,9% delle goccioline al di sotto di **60 μm** può non presentare alcun virus.

È molto improbabile che goccioline di dimensioni superiori a **60 μm** rimangano sospese nell'aria per l'infezione tramite **aerosol**. Quest'analisi porta alla conclusione che è **meno probabile** infettare per via **aerosol** i casi lievi e moderati.



La produzione di Quanti di infezione negli edifici

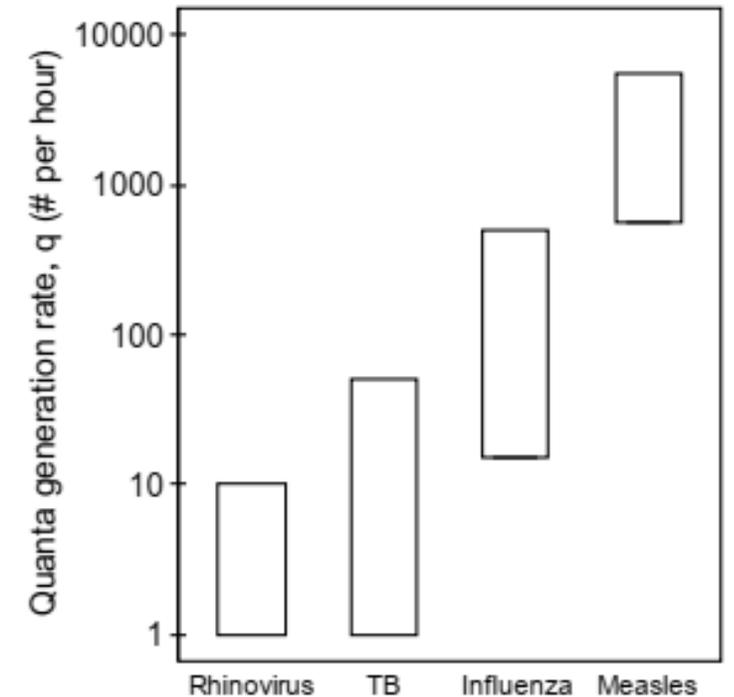
Si farà riferimento, quindi, all'*intensità di generazione di virus nell'aria*, detta **quantum di infezione**, definita come la **dose di virus necessari per infettare il 63% dei soggetti suscettibili presenti nell'ambiente**.

Un altro parametro importante in **Epidemiologia** è il **Numero di Riproduzione, R_0** , cioè quanti repliche dell'infezione si possono avere, statisticamente, dal virus.

Nella tabella si riportano i **quanta, q** , ed **R_0** per alcuni patogeni conosciuti:

Tubercolosi
MERS
SARS
Influenza
Morbillo

	q (/h)	R_0
Tuberculosis	1-50 [10]	2.22-5.46 [11]
MERS	6-140 [10]	<1(1.0-5.7) [12]
SARS	10-300 [10]	2-5 [13]
Influenza	15-500 [10]	1.6-3.0 [14]
Measles	570-5600 [10]	11-18 [15]



La produzione di Quanti di infezione negli edifici

L'esame della tabella mostra una grande variabilità dei **quanta** per i vari agenti patogeni, passando da poche unità per la **tubercolosi** a migliaia di unità per il **morbillo**.

Si ha una variabilità di due ordini di grandezza fra la **tubercolosi** e il **morbillo** che risulta essere il patogeno più infettivo.

La **SARS** e l'**Influenza** hanno un numero di **quanta/h** variabile da una decina ad alcune centinaia.

Valori dello stesso ordine di grandezza pare si abbiano anche per il patogeno **SARS-CoV-2**, come si vedrà nello studio effettuato da **Buonanno, Stabile e Morawska**, nel 2020, che consente di prevedere, nei limiti delle approssimazioni fatte da questi ricercatori, i **quanta/h** per il **SARS-Cov-2**.

Questi dati saranno poi utilizzati nei prossimi capitoli per il calcolo del rischio di contagio per gli impianti di ventilazione con le relazioni di **Walls-Riley** e di **Gammaitoni-Nucci**

Si desidera qui ribadire che la grande variabilità dei dati (ben 4 ordini di grandezza per il numero di copie di RNA) e delle condizioni di emissione dei **quanta** rende problematica la stima sufficientemente esatta del numero dei **quanta/h** a base dei calcoli.

La produzione di Quanta negli edifici – Buonanno et alii

In una recente pubblicazione i proff. **G. Buonanno** e **L. Stabile**, dell'Università di Cassino, e la prof.sa **L. Morawska**, dell'Università del Queensland, hanno stimato i **quanta** emessi per il virus **SARS-CoV-2** al fine di valutare il rischio di contagio. Gli autori utilizzano la relazione pubblicata nel 1997 da **Gammaitoni** e **Nucci**, dell'Università di Perugia, per la variazione del livello dei **quanta** in un **volume di controllo** (cioè un ambiente):

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



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Environment International

journal homepage: www.elsevier.com/locate/envint



Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment



G. Buonanno^{a,b,*}, L. Stabile^a, L. Morawska^b

^a Department of Civil and Mechanical Engineering, University of Cassino and Southern Lazio, Cassino, FR, Italy

^b International Laboratory for Air Quality and Health, Queensland University of Technology, Brisbane, Qld, Australia

La produzione di Quanta negli edifici - Buonanno

In questa relazione si ha il seguente simbolismo:

- $IVRR$ Intensità di rimozione del virus nell'ambiente, cioè il numero di ricambi orari (1/h);
- n_0 Numero iniziale dei quanti di infezione presenti nel volume;
- I Numero di soggetti infetti;
- V Volume dell'ambiente, (m^3);
- ER_q Intensità di emissione dei quanti di infezione, (quanta/h).

La produzione dei **quanti di emissione** dipende dal numero di **copie virali emesse** dal **soggetto infetto**.

Queste, indicate come **copie di RNA per mL**, dipendono dall'attività svolta (*a riposo, in piedi, parlato normale, parlato a voce alta, respirazione*) dal soggetto e dallo stato di avanzamento della malattia.

Per **tosse** e **starnuti** si ha un'emissione virale molto intensa che può arrivare a **10^{10} copie di RNA per mL**.

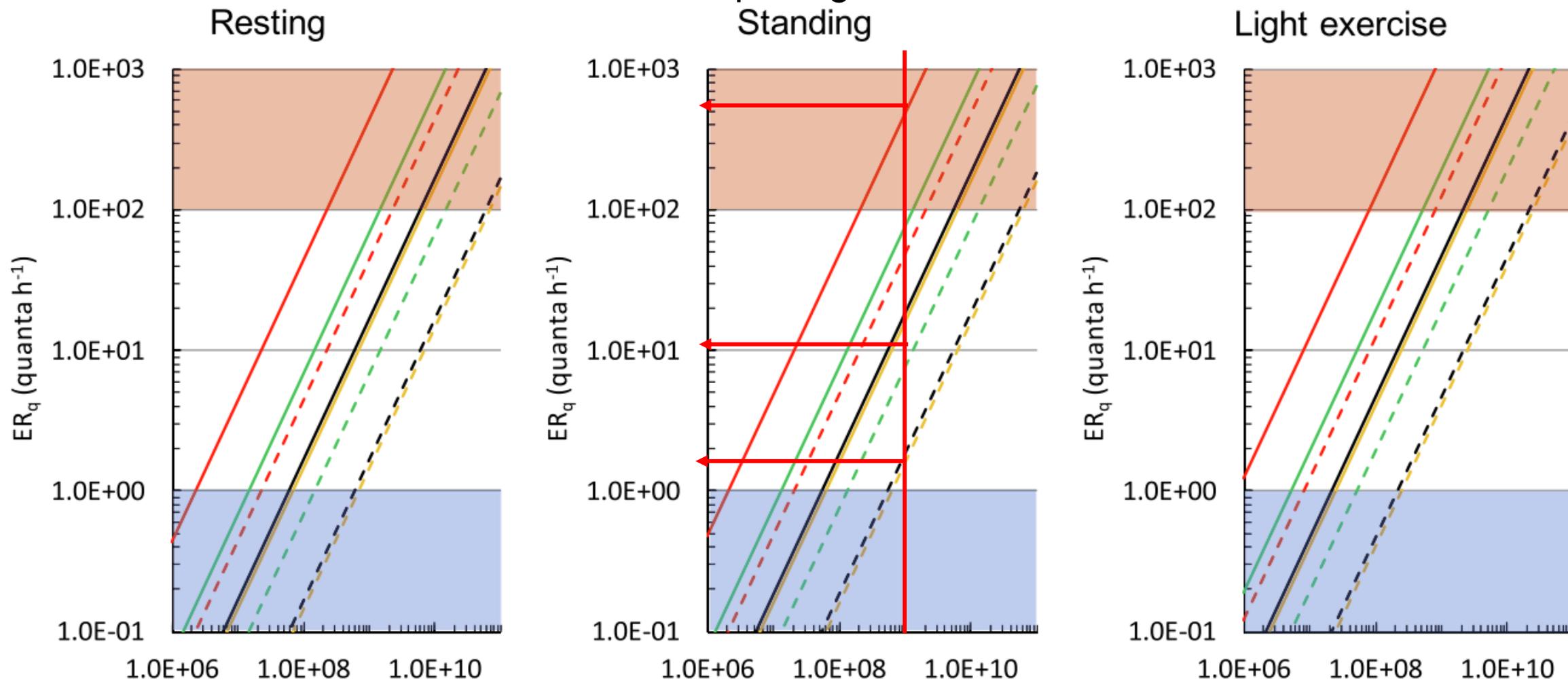
Nei grafici seguenti si considera una variabilità fra **10^6 e 10^{10} copie di RNA per mL**.

Considerando i casi indicati da **Watanabe (2010)** per **attività leggera e parlato normale** con **$c_v=10^9$ copie di RNA per mL** si ottiene una produzione di quanti di circa **142 quanta/h**.

Dall'esame degli abachi presentati nelle pagine successive si può desumere un **ER_q variabile da 10 a 500 quanta/h**.

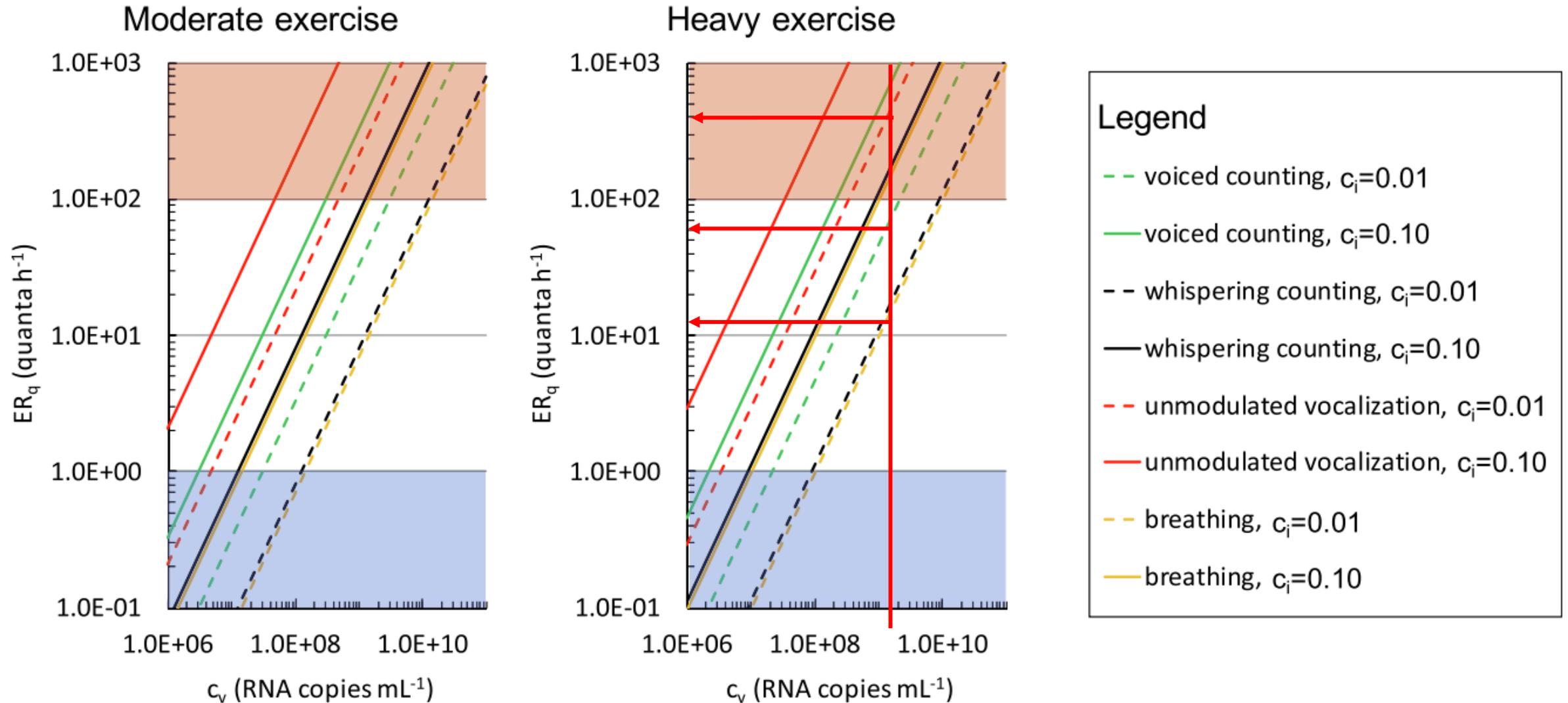
La produzione di Quanta negli edifici - Buonanno

I risultati sono riportati in figura per **attività di riposo**, **stare in piedi** ed **esercizio leggero** e varie attività di respirazione e parlato (vedi legenda nella pagina successiva). Si osserva, per il caso di stare in piedi, che a pari C_v il valore di ER_q (numero dei **quanta/h**) varia da **2** a **700**. Per altre attività si hanno variazioni ancora più significative.



La produzione di Quanta negli edifici - Buonanno

Per **attività moderata e pesante** si hanno i seguenti abachi. Valgono le stesse osservazioni fatte in precedenza.



La produzione di Quanta negli edifici - Buonanno

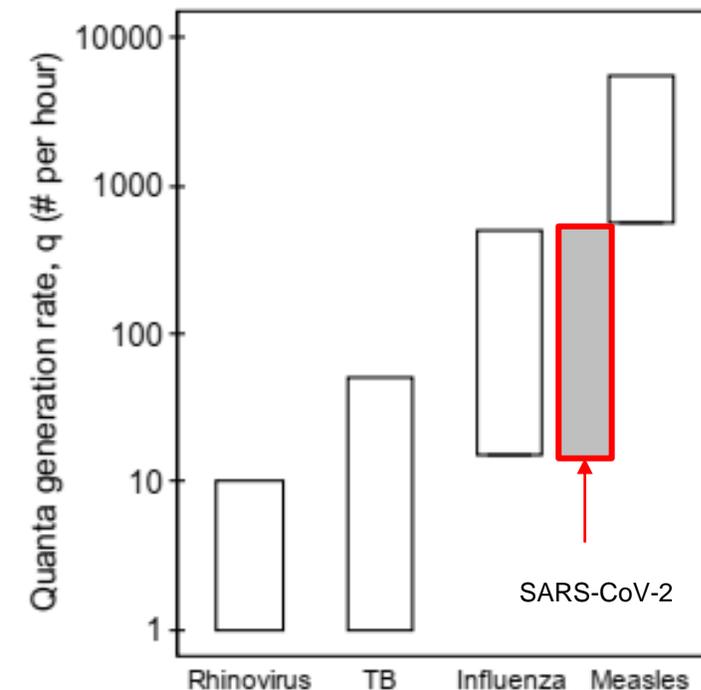
Se confrontiamo i valori standard dei **quanta/h** già noti per altre malattie infettive, vedi tabella in basso, possiamo osservare che il virus **SARS-CoV-2** si comporta essenzialmente come il virus dell'**influenza**. Volendo utilizzare questi dati per applicare le relazioni di **Walls-Riley** o di **Gammaitoni – Nucci** occorre utilizzare un valore dei **quanta/h** che meglio descriva l'attività dei soggetti (*a riposo, in piedi, attività pesante*) e il tipo di emissione dei **droplet** (*respirazione, tipo di parlato, tosse, starnuto*). Nel fare i calcoli del **rischio di contagio** nei casi comuni (*negozio, supermercato, scuola, ...*) è sempre opportuno valutare le **condizioni peggiori** e scegliere il valore di **q** all'interno dei valori proposti da **Buonanno et alii**.

Perdersi nei meandri delle centinaia di combinazioni possibili può essere un puro esercizio mentale.

Ad esempio, si possono di utilizzare i seguenti valori:

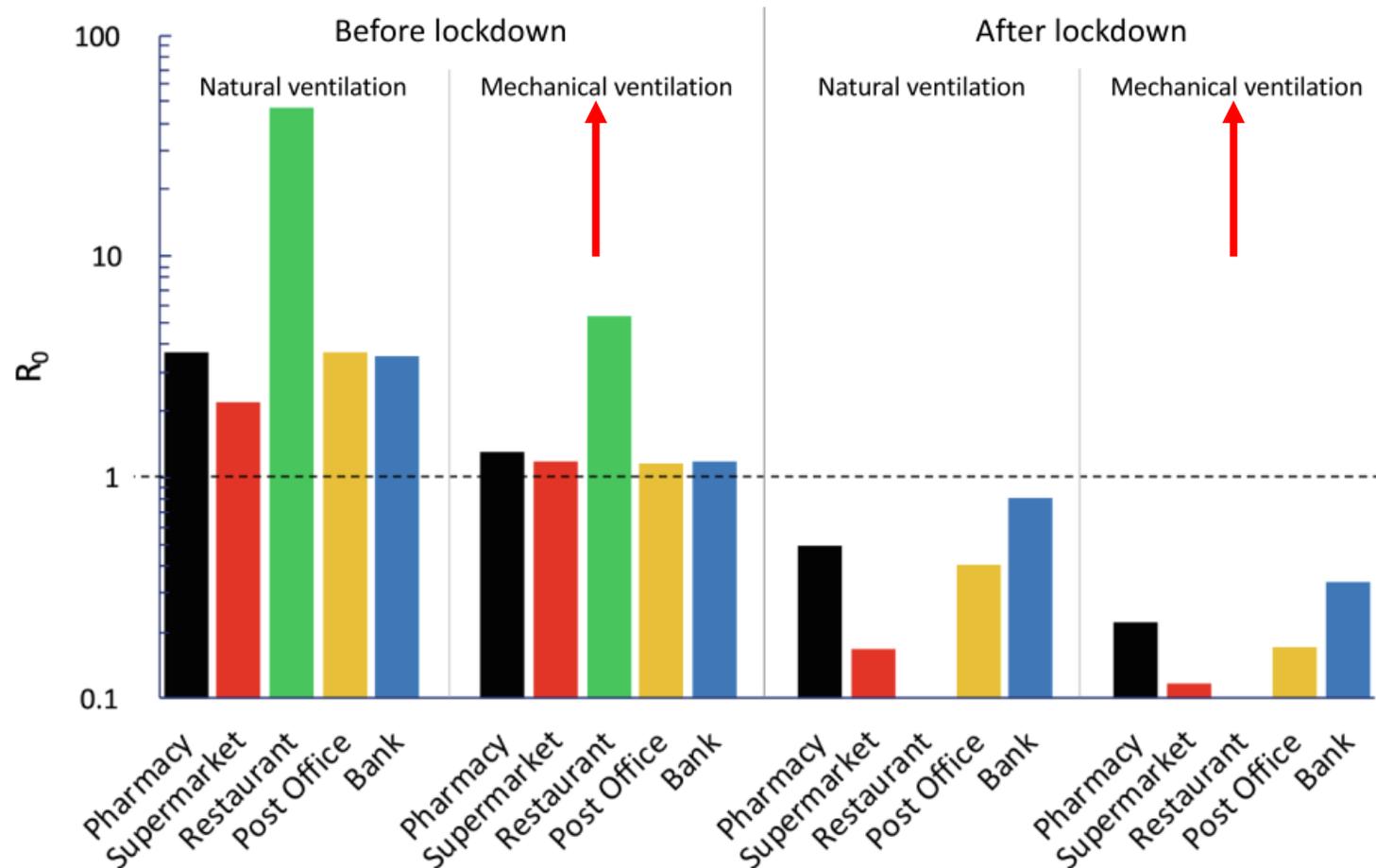
- q=50 quanta/h** per attività scolastiche;
- q=70 quanta/h** per i casi di attività commerciali;
- q=200 quanta/h** per i casi di attività fisica moderata.

		q/h	R_0
Tubercolosi	Tuberculosis	1-50 [10]	2.22-5.46 [11]
MERS	MERS	6-140 [10]	<1(1.0-5.7) [12]
SARS	SARS	10-300 [10]	2-5 [13]
Influenza	Influenza	15-500 [10]	1.6-3.0 [14]
Morbillo	Measles	570-5600 [10]	11-18 [15]

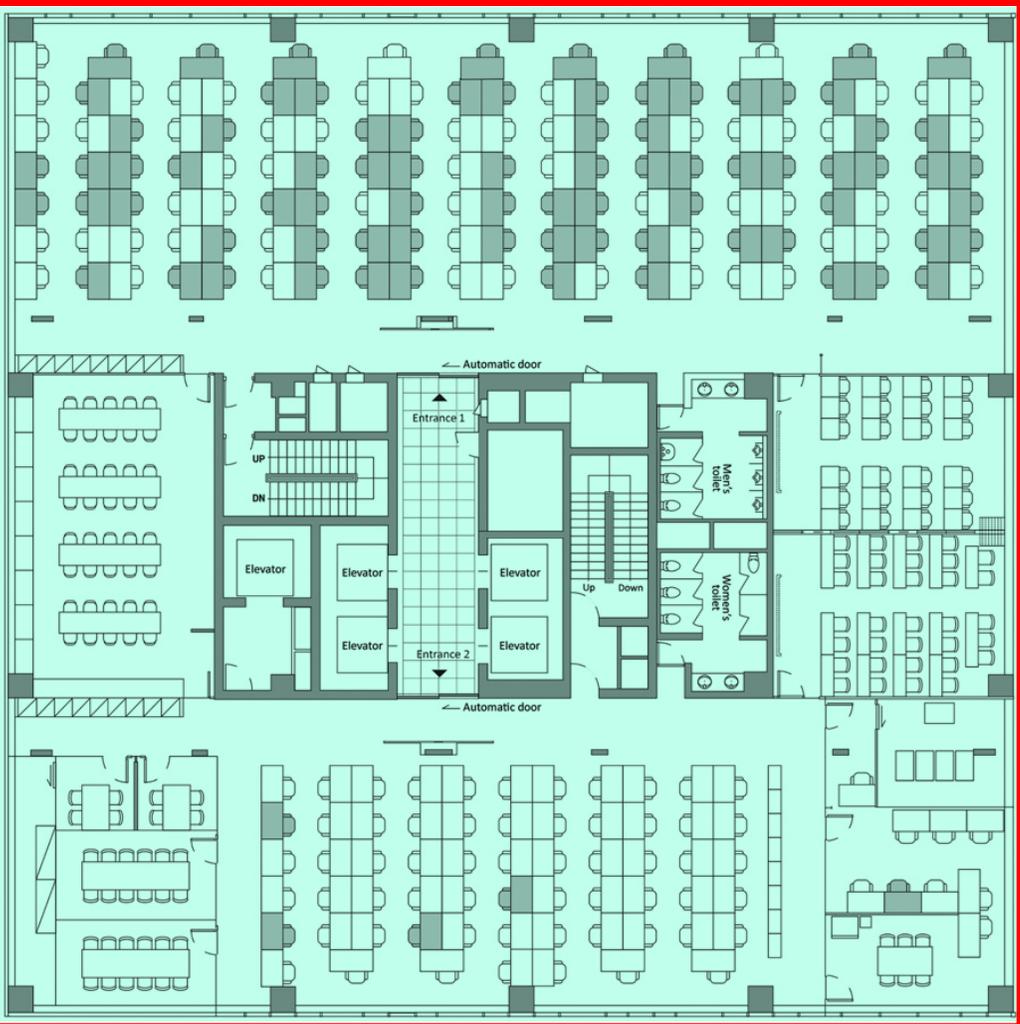
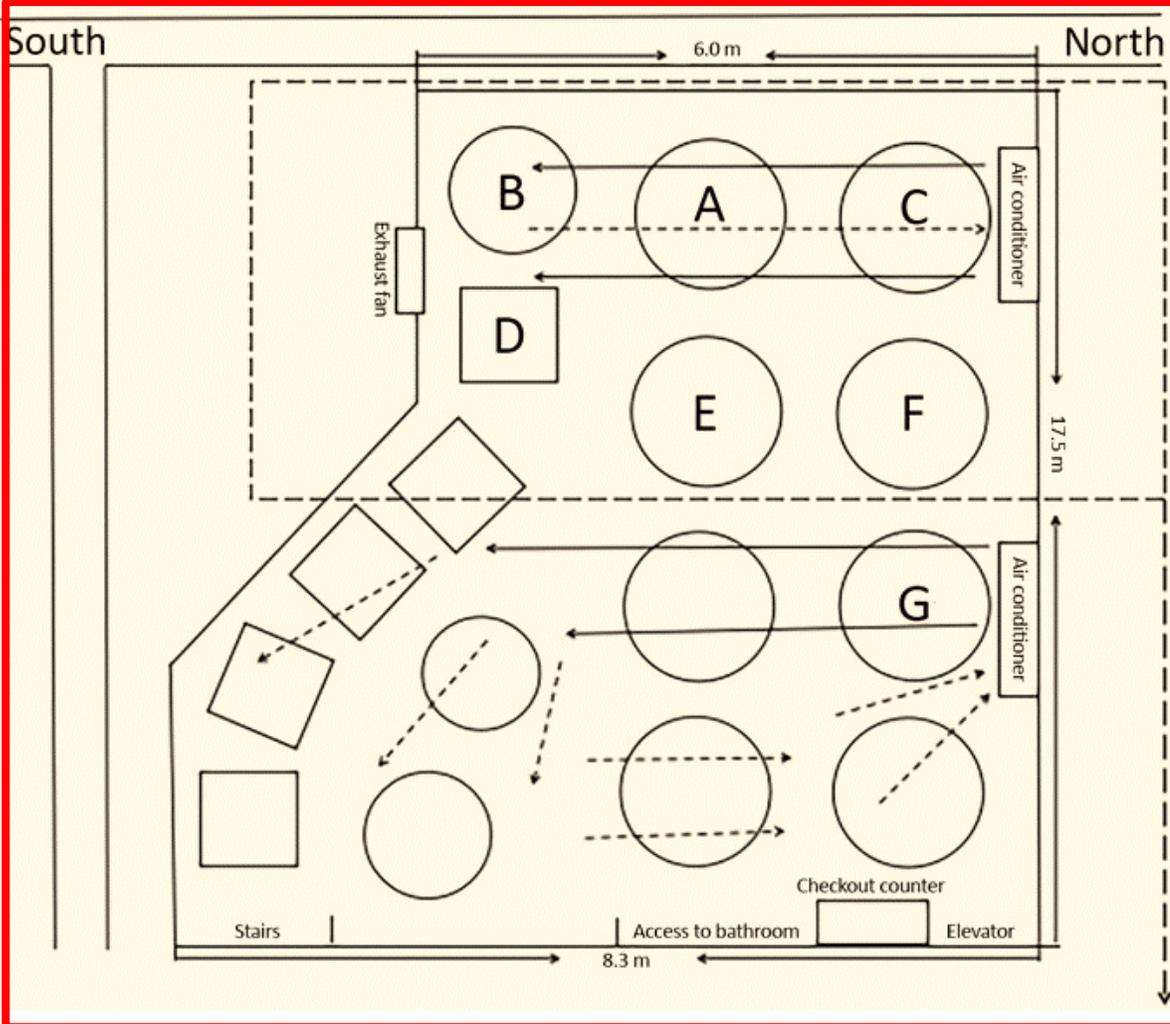


La produzione di Quanta negli edifici - Buonanno

Lo studio di *Buonanno et alii* è stato applicato anche per un **supermercato**, un **ristorante** ed un **ufficio postale** ed una **banca**, nel periodo del **lockdown**, sia con ventilazione naturale che forzata, nell'ipotesi di esercizio leggero con $ER_q = 142 \text{ quanta/h}$, con soggetto infetto con $c_v = 10^9 \text{ copie/mL}$ di RNA. Si osservi come la **ventilazione meccanica riduca il rischio di contagio** rispetto alla **ventilazione naturale**.



CASI CENSITI DI TRASMISSIONE DELLA COVID 19



Caso esempio N 1 – Ristorante di Guangzhou

In *Letteratura* è presente uno studio sui casi di infezione in un ristorante di **Guangzhou** in Cina.

L'articolo è riportato dalla rivista «**Emerging infectious diseases**», pubblicato in via definitiva a *luglio 2020* con il titolo:

Lu J., Gu J., Li K., Xu C., Su W., Lai Z., Zhou D., Yu C., Xu B., Yang Z. 2020.

«*COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020. Emerging infectious diseases*»

EMERGING INFECTIOUS DISEASES®

EID Journal > Volume 26 > Early Release > Main Article

Disclaimer: Early release articles are not considered as final versions. Any changes will be reflected in the online version in the month the article is officially released.

Volume 26, Number 7—July 2020

Research Letter

COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China

Jianyun Lu¹, Jieni Gu¹, Kuibiao Li¹, Conghui Xu¹, Wenzhe Su, Zhisheng Lai, Deqian Zhou, Chao Yu, Bin Xu, and Zhicong Yang

Author affiliations: Guangzhou Center for Disease Control and Prevention, Guangzhou, China (J. Lu, K. Li, C. Xu, W. Su, C. Yu, Z. Yang);

Guangzhou Yuexiu District Center for Disease Control and Prevention, Guangzhou, China (J. Gu, Z. Lai, D. Zhou, B. Xu)

[Suggested citation for this article](#)

Abstract

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.

From January 26 through February 10, 2020, an outbreak of 2019 novel coronavirus disease (COVID-19) affected 10 persons from 3 families (families A–C) who had eaten at the same air-conditioned restaurant in Guangzhou, China. One of the families had just traveled from Wuhan, Hubei Province, China. We performed a detailed investigation that linked these 10 cases together. Our study was approved by the Ethics Committee of the Guangzhou Center for Disease Control and Prevention.

On January 23, 2020, family A traveled from Wuhan and arrived in Guangzhou. On January 24, the index case-patient (patient A1) ate lunch with 3 other family members (A2–A4) at restaurant X. Two other families, B and C, sat at neighboring tables at the same restaurant. Later that day, patient A1 experienced onset of fever and cough and went to the hospital. By February 5, a total of 9 others (4 members of family A, 3 members of family B, and 2 members of family C) had become ill with COVID-19.

Caso esempio N 1 – Ristorante di Guangzhou

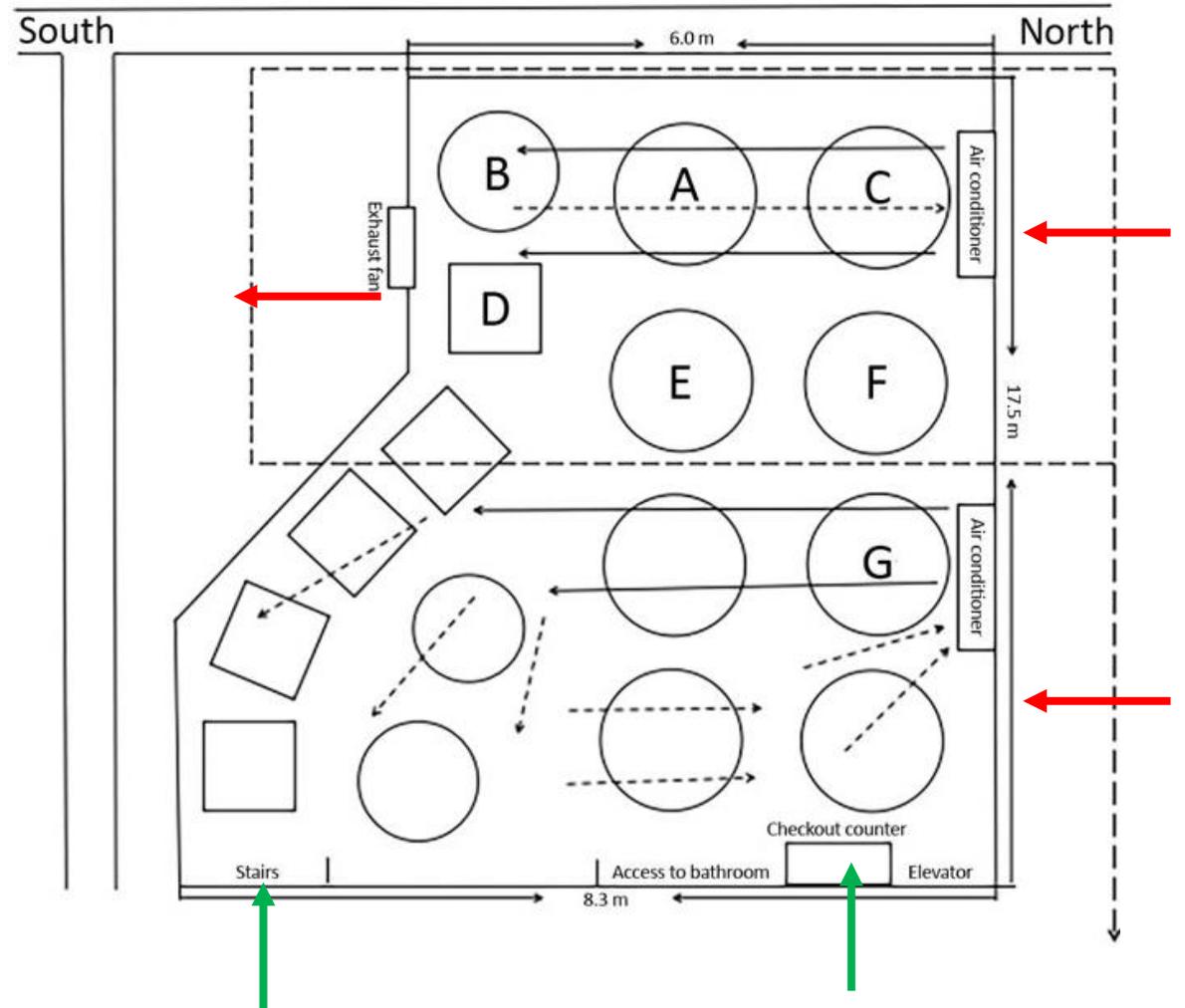
In figura è possibile osservare la **sala ristorante** di circa **145 m²** con la disposizione dei tavoli e di due condizionatori a parete, verosimilmente due sistemi split applicati a soffitto in corrispondenza della parete laterale ad est.

Nessun dato tecnico è fornito sugli split. Non ne conosciamo la potenzialità, la portata, le condizioni psicrometriche dell'aria inviata in ambiente.

Non sono note tutte le dimensioni della sala e l'altezza. Inoltre, L'edificio di *4 piani* è dichiarato senza finestre (non segnate nella pianta del ristorante) e pertanto si deve ritenere che ***i ricambi d'aria siano assicurati solo attraverso gli impianti di climatizzazione e dai contributi dovuti all'apertura delle porte di ingresso e dell'ascensore.***

Non si ha modo di conoscere la portata totale di **Ventilazione naturale** (stimata pari a **0.3 Vol/h**).

Le **UNI 10339** in Italia indicano **40 m³/h** per persona ma nel ristorante questo valore non sembra essere stato raggiunto.



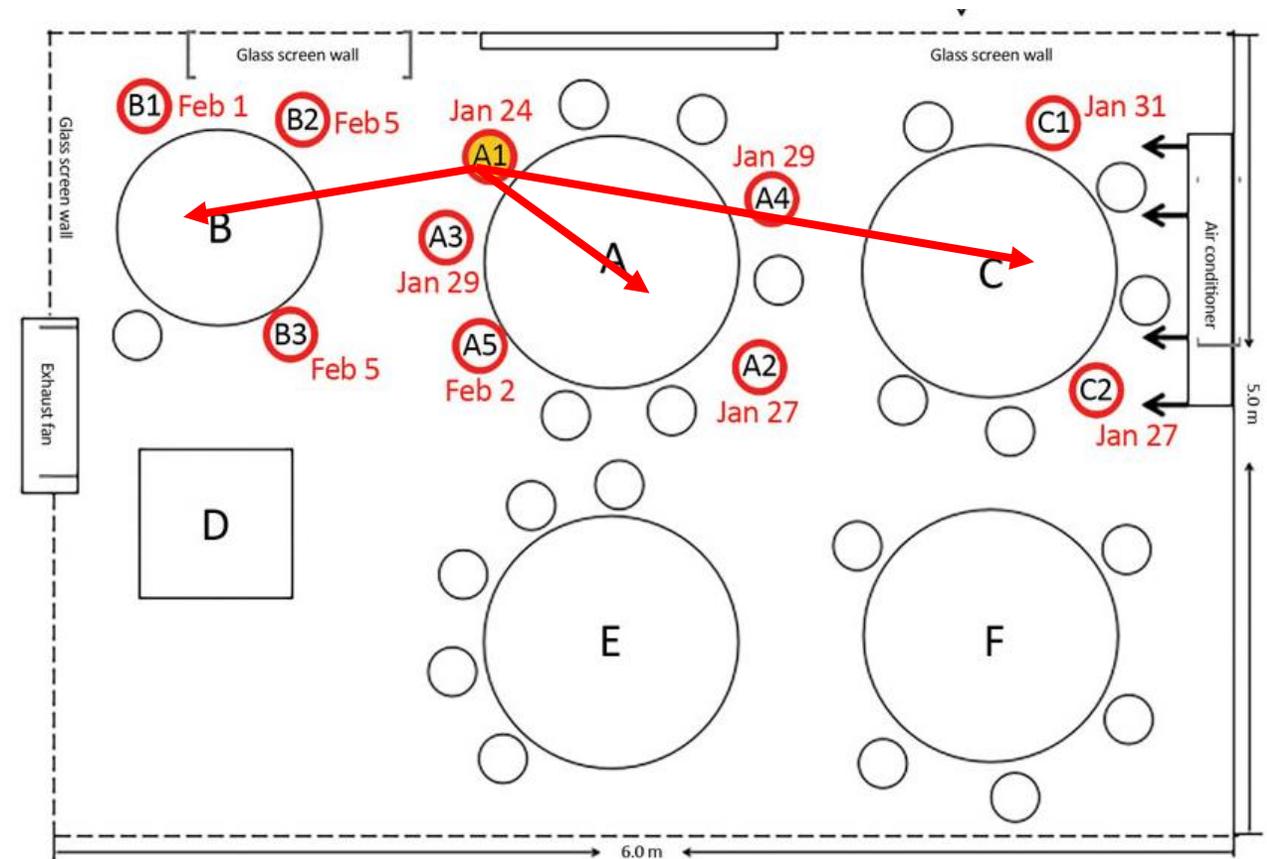
Caso esempio N 1 – Ristorante di Guangzhou

Lo studio effettua un'analisi *a posteriori* di una serie di contagi dovuti ad un soggetto infetto da corona virus, indicato con la lettera **A1** nel tavolo **A**, rilevando poi una serie di contagi, **successivi all'incontro nel ristorante**, nelle persone dei tavoli **B** e **C**, oltre che nello stesso tavolo **A**.

La seconda fila di tavoli **D**, **E** ed **F**, non ha prodotto contagi. La situazione dei contagi è riportata nella figura a lato che riproduce la parte superiore del ristorante interessata ai fatti.

Gli autori attribuiscono i contagi alla **ventilazione** prodotta dal **condizionatore a destra** della stessa sala.

Il fatto che la seconda fila dei tavoli, fuori dal flusso dell'aria di mandata del condizionatore, non abbiano avuto contagiati ha rafforzato l'idea che fosse proprio la **ventilazione del primo condizionatore la causa della propagazione del contagio.**



Caso esempio N 1 – Ristorante di Guangzhou

I tre elementi chiave della **ventilazione** che influenzano la trasmissione per via aerea sono raffigurati nella figura.

Il soggetto infetto emette **droplet** dalla bocca (e/o dal naso) per respirazione, parlato, tosse e starnuti. La direzione di emissione è **preferenzialmente in avanti**.

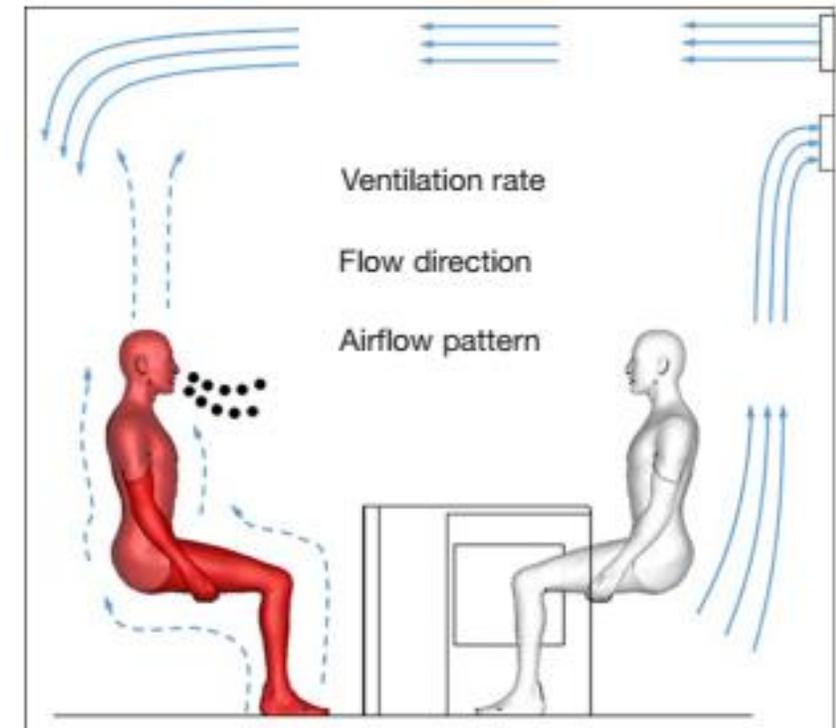
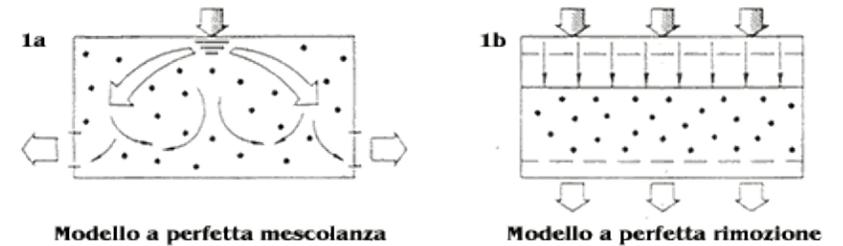
I droplet hanno velocità iniziali variabili da **2 a 60 m/s**, a seconda del tipo di emissione.

L'aria di **ventilazione**, supposta immessa mediante bocchette poste in alto (*mixing ventilation*), ha una **velocità di uscita** che è funzione della **portata d'aria** e del **lancio** che si desidera raggiungere.

In ogni caso, l'aria **circola dall'alto verso il basso** e, dopo il lancio si pone in **equilibrio termodinamico** con l'ambiente.

La velocità nella zona centrale dell'ambiente (detta **zona di vita**) è non superiore a **0.15 – 0.20 m/s**, come richiede la Norma UNI 7730.

A quest'aria di **ventilazione** si somma l'aria messa in movimento dai **pennacchi termici** presenti (*persone, computer, finestre, ...*), oltre che dai **movimenti delle braccia o altre parti del corpo umano**.



Caso esempio N 1 – Ristorante di Guangzhou

Un'osservazione importante deve essere fatta sull'effetto della **ventilazione indotta dagli split** a parete, posti in alto, del ristorante.

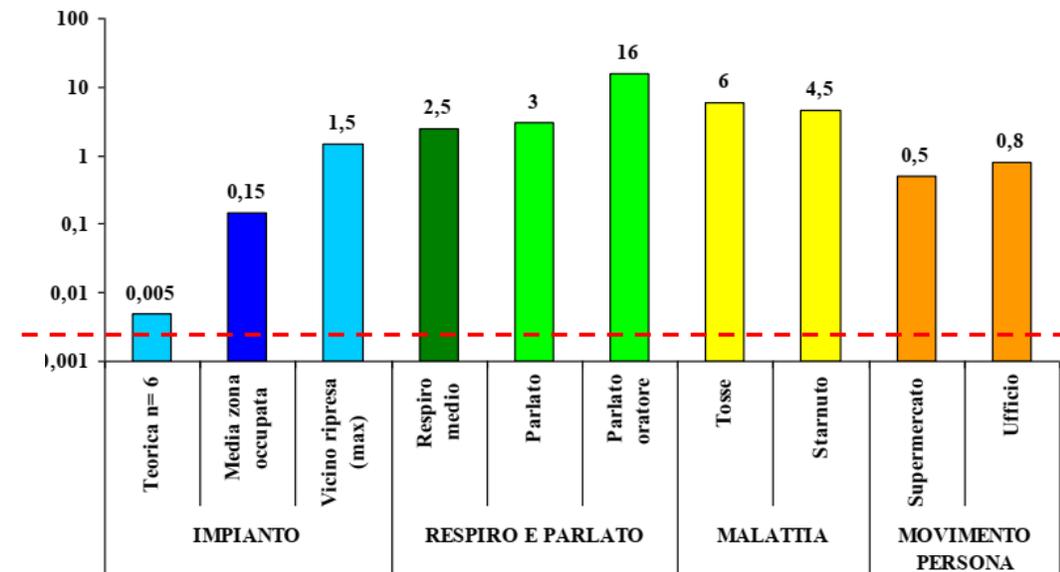
Gli autori dell'articolo pensano che i droplet emessi dall'infetto **A1** siano stati trasportati negli altri tavoli della fila dall'aria di ventilazione dello split a parete. In realtà si tratta di **contagio a breve distanza**.

Se consideriamo i soggetti seduti ai tavoli erano in attività sedentaria e parlavano a voce medio alta, allora la velocità dei **droplet** espulsi dalla bocca dell'infetto viaggiavano ad una velocità fra **2.5 e 4 m/s** (compresa la normale respirazione). La velocità dell'aria nella zona centrale della stanza per effetto della mandata dello split non poteva essere superiore a **0.2-0.3 m/s**. Pertanto, la combinazione fra la velocità dei droplet espulsi e quelli di ventilazione dello split variava (considerando i percorsi equiversi e controversi) fra **2.3 e 4.2 m/s**.

In definitiva, l'effetto di trasporto dovuto allo split era **trascurabile** rispetto alla velocità dei droplet del parlato con tono moderato.

In figura si osserva che **A1** ha infettato 4 soggetti a sinistra e 4 a destra, a conferma di quanto detto.

E' evidente che il rischio di infezione era alto perché **mancava quasi del tutto la ventilazione con aria fresca esterna** (valutata in circa **0.3 Vol/h**).



Caso esempio N 1 – Ristorante di Guangzhou

Gli autori, consci dell'analisi parziale dei dati e **non essendo esperti di impianti** di climatizzazione, concludono l'articolo con le seguenti frasi:

“Our study has limitations. We did not conduct an experimental study simulating the airborne transmission route. We also did not perform serologic studies of swab sample–negative asymptomatic family members and other diners to estimate risk for infection.

We conclude that in this outbreak, droplet transmission was prompted by air-conditioned ventilation. The key factor for infection was the direction of the airflow. Of note, patient B3 was afebrile and 1% of the patients in this outbreak were asymptomatic, providing a potential source of outbreaks among the public (7,8). To prevent spread of COVID-19 in restaurants, we recommend strengthening temperature-monitoring surveillance, increasing the distance between tables, and improving ventilation.”

Ossia:

«Il nostro studio ha dei limiti. Non abbiamo condotto uno studio sperimentale per simulare la via di trasmissione aerea. Inoltre, non abbiamo eseguito studi sierologici su familiari asintomatici negativi al campione di tampone e altri commensali per stimare il rischio di infezione.

Concludiamo che in questo focolaio la trasmissione delle goccioline è stata stimolata dalla ventilazione con aria condizionata. Il fattore chiave per l'infezione era la direzione del flusso d'aria. Da notare che il paziente B3 era senza febbre e l'1% dei pazienti in questo focolaio era asintomatico, fornendo una potenziale fonte di focolai tra il pubblico (7,8). Per prevenire la diffusione di COVID-19 nei ristoranti, si consiglia di rafforzare la sorveglianza del monitoraggio della temperatura, aumentare la distanza tra i tavoli e migliorare la ventilazione.»

Caso esempio N 1 – Ristorante di Guangzhou

L'esame critico di questo studio porta ad alcune considerazioni importanti che qui si riassumono:

1. Uno **studio scientifico** deve essere condotto **a tutto campo** analizzando tutti gli aspetti fisici (*impiantistici*), biologici ed epidemiologici presenti nella scena;
2. La **manca**za di **esperienza negli impianti di climatizzazione** non giustifica la formulazione di ipotesi conclusive affrettate e, verosimilmente, non corrette;
3. La pubblicazione su rivista scientifica di un articolo sui meccanismi di infezione da **COVID 19** per un caso di vita comune in un periodo di forte espansione e sofferenza della pandemia **SARS-CoV-2 ha amplificato gli effetti negativi erroneamente segnalati**;
4. La pubblicazione sul caso del **ristorante di Guangzhou** è stata ripresa da una virologa di fama internazionale, la dott.sa **Ilaria Capua che**, in vari servizi televisivi e giornalistici, ha riportato le conclusioni parziali degli autori, **inducendo l'idea che gli impianti di condizionamento siano pericolosi perché veicolano i virus con la diffusione dell'aria**;
5. La presunta diffusione del virus **SARS-CoV-2** negli **impianti di condizionamento delle navi da crociera** ha rafforzato ancora di più la convinzione popolare della pericolosità di questi impianti;
6. **L'elevato numero di morti da COVID 19 negli ospedali italiani**, specialmente nella fase iniziale nelle sale di terapie intensive, ha ancora una volta alimentato il dubbio sulla pericolosità degli impianti di ventilazione.

Caso esempio N 2 – Call center in Corea del Sud

Si esamina un secondo caso di diffusione della **COVID 19** in un **Call Center** nella **Corea del Sud**.

L'articolo è riportato ancora nella rivista **Emerging Infectious Diseases**, come riportato nella figura a lato.

EMERGING INFECTIOUS DISEASES®

EID Journal > Volume 26 > Early Release > Main Article

Disclaimer: Early release articles are not considered as final versions. Any changes will be reflected in the online version in the month the article is officially released.

Volume 26, Number 8—August 2020

Synopsis

Coronavirus Disease Outbreak in Call Center, South Korea

Shin Young Park, Young-Man Kim, Seonju Yi, Sangeun Lee, Baeg-Ju Na, Chang Bo Kim, Jung-il Kim, Hea Sook Kim, Young Bok Kim, Yoojin Park, In Sil Huh, Hye Kyung Kim, Hyung Jun Yoon, Hanaram Jang, Kyungnam Kim, Yeonhwa Chang, Inhye Kim, Hyeyoung Lee, Jin Gwack, Seong Sun Kim, Miyoung Kim, Sanghui Kweon, Young June Choe, Ok Park, Young Joon Park, and Eun Kyeong Jeong✉

Author affiliations: Korea Centers for Disease Control and Prevention, Cheongju, South Korea (S.Y. Park, Y.-M. Kim, S. Yi, S. Lee, H. Lee, J. Gwack, S.S. Kim, M. Kim, S. Kweon, O. Park, Y.J. Park, E.K. Jeong); Seoul Metropolitan Government, Seoul, South Korea (B.-J. Na, J.-i. Kim, H.S. Kim, Y.B. Kim); Seoul Health Foundation, Seoul (C.B. Kim); Seoul Center for Infectious Disease Control and Prevention, Seoul (Y. Park, I.S. Huh); Incheon Metropolitan City, Incheon, South Korea (H.K. Kim, H.J. Yoon, H. Jang); Gyeonggi Provincial Office, Suwon, South Korea (K. Kim, Y. Chang, I. Kim); Hallym University College of Medicine, Chuncheon, South Korea (Y.J. Choe)

[Suggested citation for this article](#)

Abstract

We describe the epidemiology of a coronavirus disease (COVID-19) outbreak in a call center in South Korea. We obtained information on demographic characteristics by using standardized epidemiologic investigation forms. We performed descriptive analyses and reported the results as frequencies and proportions for categorical variables. Of 1,143 persons who were tested for COVID-19, a total of 97 (8.5%, 95% CI 7.0%–10.3%) had confirmed cases. Of these, 94 were working in an 11th-floor call center with 216 employees, translating to an attack rate of 43.5% (95% CI 36.9%–50.4%). The household secondary attack rate among symptomatic case-patients was 16.2% (95% CI 11.6%–22.0%). Of the 97 persons with confirmed COVID-19, only 4 (1.9%) remained asymptomatic within 14 days of quarantine, and none of their household contacts acquired secondary infections. Extensive contact tracing, testing all contacts, and early quarantine blocked further transmission and might be effective for containing rapid outbreaks in crowded work settings.

Since the first imported case of coronavirus disease (COVID-19) was confirmed in South Korea on January 20, 2020, a sharp increase in the number of COVID-19 cases has been observed, with most infections being reported from specific clusters (1). Outbreaks of COVID-19 related to mass gathering, religious activities, workplaces, and hospitals have accounted for the largest portion cases in the national outbreak (1).

In March 2020, the Korea Centers for Disease Control and Prevention (KCDC), South Korea's national-level public health authority, was informed about a cluster of cases of COVID-19 in a call center located in a commercial-residential mixed-use building (building X) in the capital city of Seoul. We describe the epidemiology of this COVID-19 outbreak and detail the containment efforts to limit the spread of the disease.

Caso esempio N 2 – Call center in Corea del Sud

Il **Call Center** ha una planimetria complessa, come riportato in figura ove sono anche riportati i casi di contagi verificati.

Una sola persona infetta ha condiviso lo spazio con altri **216** impiegati. Nel corso di una settimana, **94** di questi sono stati contagiati (le sedie azzurre) e tutti, tranne due, hanno poi sviluppato sintomi della **COVID-19**.

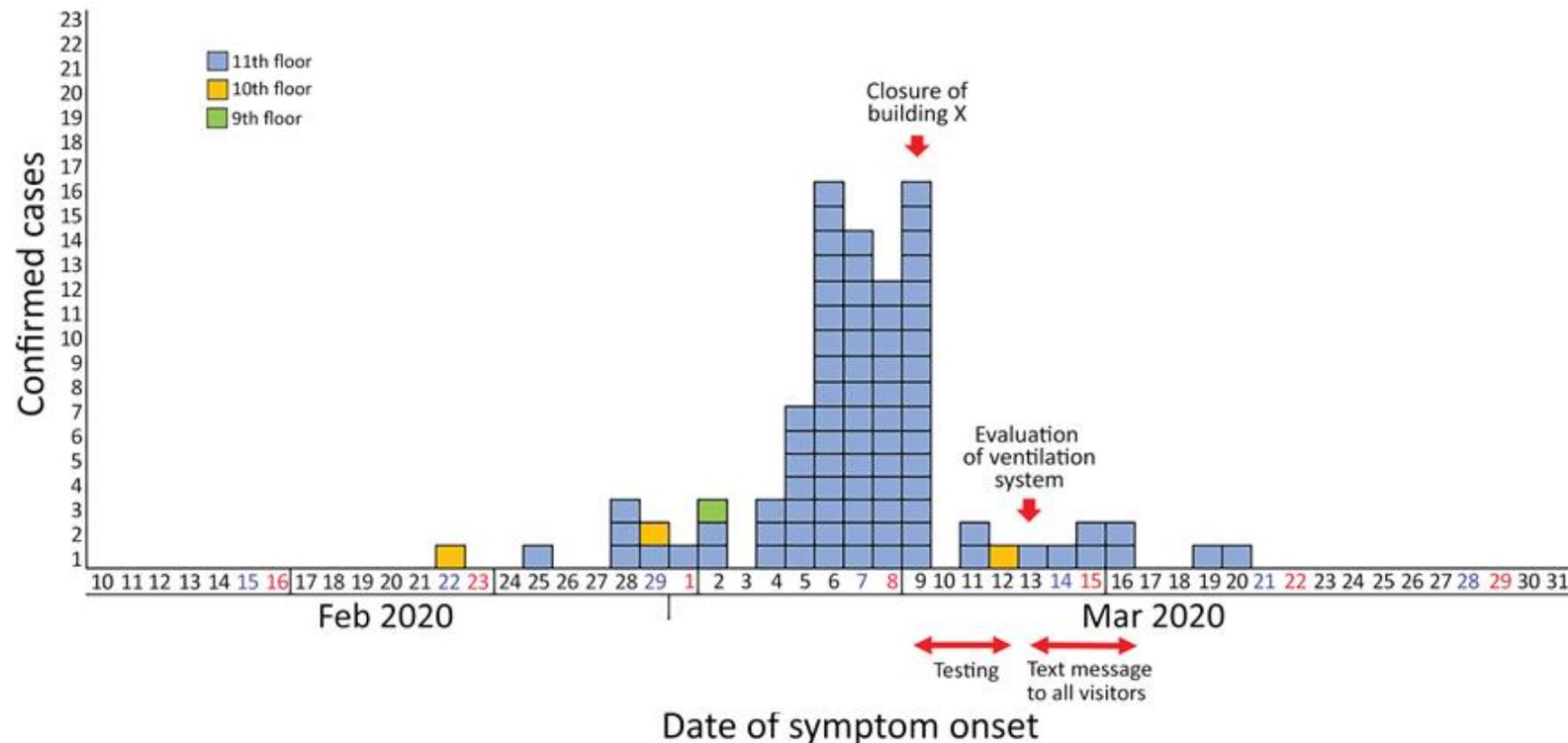
Dallo schema è evidente come il contagio abbia interessato quasi esclusivamente le postazioni **in alto dell'ufficio**, a conferma che **la condivisione di uno stesso spazio a poca distanza da un infetto** possa fare la differenza.



Caso esempio N 2 – Call center in Corea del Sud

La **sequenza temporale** dei contagi è riportata nella figura seguente. I **droplet** hanno sicuramente avuto un ruolo centrale nella diffusione del contagio, ma **non possiamo stabilire con certezza se siano stati respirati direttamente**.

Ci sono state situazioni in cui i soggetti **toccavano** oggetti e superfici (*tastiere del computer, microfoni, cuffie, maniglie e altri utensili, per citarne solo alcuni*) sui quali potevano essersi depositati i droplet o per via diretta, o dopo che l'infetto aveva tossito su una mano prima di toccare qualcos'altro.



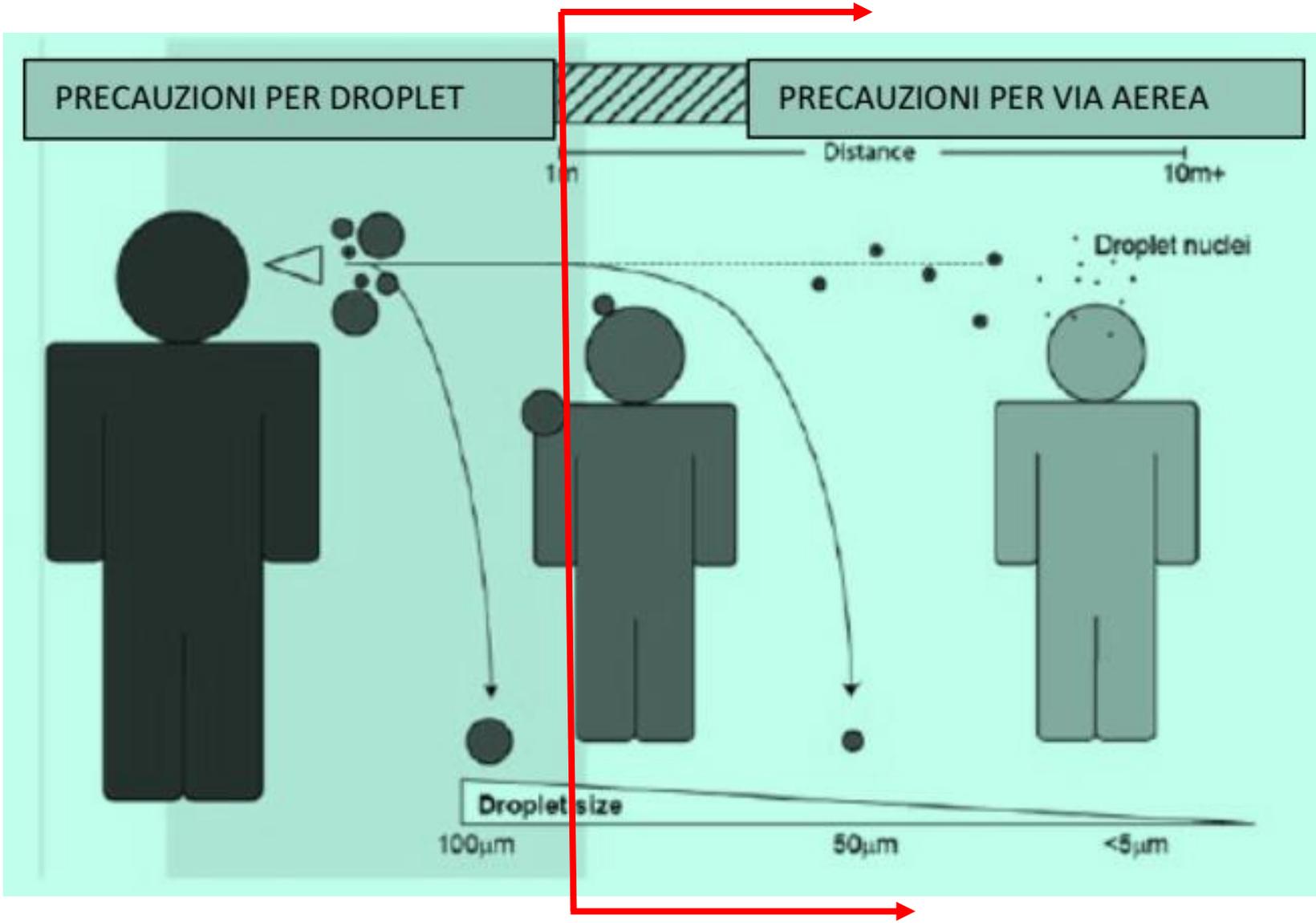
Considerazioni dai casi esempio

I casi esempio prima considerati consentono di fare alcune considerazioni:

1. La diffusione dei contagi a **breve distanza** risente in qualche modo della **presenza di droplet**, del loro percorso in aria ma anche **della loro deposizione sugli oggetti sottostanti** che, per contatto diretto con le mani, possono essere riportati alla bocca, negli occhi e nel naso;
2. La **distanza dagli infetti** gioca un ruolo importantissimo. In entrambi i casi esempio **i soggetti lontani dagli infetti sono stati raramente infettati**;
3. **I contagi sono più probabili all'interno di locali chiusi** che all'aperto. La **ventilazione** naturalmente presente all'aperto favorisce il disperdimento dei **droplet**;
4. I locali chiusi **ben ventilati** (come si vedrà nel prosieguo) **riducono molto la probabilità di rischio a lunga distanza** e pertanto *non sono gli impianti di condizionamento che sic et simpliciter causano i contagi ma il loro cattivo uso e/o la progettazione non conforme agli standard, la non corretta distribuzione dell'aria, la limitata portata di ventilazione e l'eventuale presenza mal condizionato del **ricircolo** dell'aria, lo scarso funzionamento o l'insufficienza dei filtri dell'aria immessa negli ambienti.*

Nei prossimi capitoli si vedrà come proprio la presenza di un impianto di condizionamento correttamente progettato **possa ridurre significativamente il rischio di contagi** da qualunque virus, unitamente alle tecniche di distanziamento e di difesa passiva consigliati dai virologi.

MECCANISMI DI TRASMISSIONE A GRANDE DISTANZA



Meccanismi di trasmissione a lunga distanza

Il meccanismo di trasmissione a **grande distanza** è stato ritenuto, fino a poco tempo fa e ancora persiste questo convincimento per gran parte dei virologi, poco influente per trasmissione del virus perché dovuta principalmente all'**aerosol** che si forma dopo la vaporizzazione iniziale dei **droplet**. L'**aerosol** si mantiene in sospensione per ore (da 3 a 10 e più) ed è costituito da particella molto piccole rispetto ai **droplet** e tali da interessare, secondo i virologi, solo le vie di respirazione superiori e non quelle inferiori, come invece succede per i **droplet**. Recentemente si sono avute conferme di trasmissione di contagi per via aerea (quindi con **aerosol**) e sono stati ripresi gli studi effettuati fin dal 1859 da **Florence Nightingale** per la diffusione della **tubercolosi** negli ospedali.

Malgrado l'ampia letteratura scientifica in questo settore, della quale si presenta una breve e significativa rassegna, sembra che i virologi non vedano di buon occhio i risultati consolidati dal oltre 70 anni, a partire dagli studi seminali di **Walls, O'Connor e Riley** nel 1957.

Questi studi dimostrano in modo chiaro, **scientificamente inconfutabile**, che **la ventilazione dei locali chiusi con aria fresca esterna riduce grandemente il rischio di contagio per via aerea (lunghe distanze) ed è l'unico mezzo di protezione possibile**.

La **ventilazione** (sia **naturale** che **meccanica**) interessa gli impianti di climatizzazione che, purtroppo, non sono di pertinenza dei medici e, in particolare, dei virologi, e pertanto si sono generate confusioni, **errate interpretazioni** dei fatti e **formazione di preconcetti** che hanno portato anche all'emissione di norme molto restrittive sull'utilizzo degli impianti di climatizzazione.

LETTERATURA SUI CONTAGI PER VIA AEREA

HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases

Final Report

Prepared for:

The National Air Filtration Association (NAFA) Foundation
291 Independence Blvd., Virginia Beach, VA 23462

Prepared by:

Dr. Brent Stephens
Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering
Illinois Institute of Technology
March 1, 2012

The Built Environment Research Group

advancing energy, environmental, and sustainability
research within the built environment
at Illinois Institute of Technology



www.built-envi.com

La diffusione dei contagi – Il fiorire di pubblicazioni

I primi casi di studio analizzati erano relativi alla propagazione della **tubercolosi**, male endemico nell'Ottocento e che sta riprendendo quota anche recentemente.

Inizialmente si pensava che **la tubercolosi fosse genetica**, in considerazione del fatto che gli ammalati appartenevano quasi sempre ad un nucleo familiare.

Successivamente nel **1882 Koch** (che diede il nome al *bacillo di Koch*) scoprì che la tubercolosi era di **origine batterica** e non genetica.

Inoltre, la **contagiosità della tubercolosi era molto elevata** per cui se un componente di una famiglia si ammalava era molto probabile che si ammalassero tutti gli altri componenti.

Il **meccanismo di contagio dei batteri** (e dei virus) venne studiato nel **1934** da **Walls** che formulò l'ipotesi che questi potessero essere presenti in residui secchi di goccioline (**droplet**) emesse dai contagiati attraverso la **respirazione, la tosse, gli starnuti e anche parlando**.

Infine nel **1961 Riley e O'Grady** hanno definitivamente dimostrato che la trasmissione dei contagi della tubercolosi avveniva per **via aerea** tramite l'emissione dei **droplet**.

Questa teoria è oggi universalmente accettata e sono stati fatti innumerevoli studi di approfondimento di questo argomento, come esemplificato nelle pagine seguenti.

La diffusione dei contagi – Le prime pubblicazioni

HOSPITALS

Two Papers Read Before the National Association for the Promotion of Social Science, at Liverpool in October, 1858 with Evidence Given to the Royal Commissioners on the State of the Army in 1857

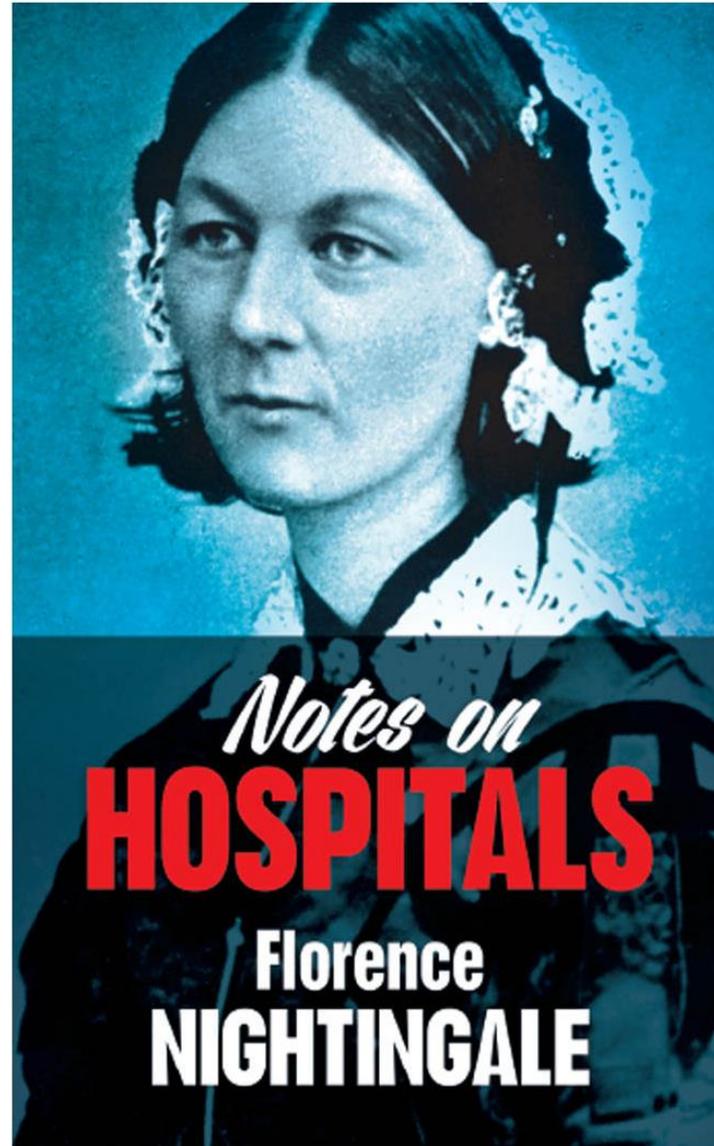
**Florence
NIGHTINGALE**

**Dover Publications, Inc.
Mineola, New York**

Le **epidemie** e le **pandemie** sono sempre state presenti nella storia dell’Uomo.

Solo di recente i fenomeni di diffusione dei contagi sono stati correttamente studiati.

La **prima pubblicazione** che tratta questo argomento è del **1857** e studia gli ospedali con casi di tubercolosi.



Esempi di pubblicazioni scientifiche

Wells-Riley & HVAC Filtration for infectious airborne aerosols

NAFA Foundation Report

Indoor Air 2003; 13: 237–245
www.blackwellpublishing.com/ina
Printed in Denmark. All rights reserved

Copyright © Blackwell Munksgaard 2003
INDOOR AIR
ISSN 0905-6947

HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases

Final Report

Prepared for:

The National Air Filtration Association (NAFA) Foundation
291 Independence Blvd., Virginia Beach, VA 23462

Prepared by:

Dr. Brent Stephens

Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering
Illinois Institute of Technology
March 1, 2012

The Built Environment Research Group

advancing energy, environmental, and sustainability
research within the built environment
at Illinois Institute of Technology



www.built-envi.com

Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration

Abstract The Wells–Riley equation, which is used to model the risk of indoor airborne transmission of infectious diseases such as tuberculosis, is sometimes problematic because it assumes steady-state conditions and requires measurement of outdoor air supply rates, which are frequently difficult to measure and often vary with time. We derive an alternative equation that avoids these problems by determining the fraction of inhaled air that has been exhaled previously by someone in the building (rebreathed fraction) using CO₂ concentration as a marker for exhaled-breath exposure. We also derive a non-steady-state version of the Wells–Riley equation which is especially useful in poorly ventilated environments when outdoor air supply rates can be assumed constant. Finally, we derive the relationship between the average number of secondary cases infected by each primary case in a building and exposure to exhaled breath and demonstrate that there is likely to be an achievable critical rebreathed fraction of indoor air below which airborne propagation of common respiratory infections and influenza will not occur.

S. N. Rudnick¹, D. K. Milton^{1,2}

¹Department of Environmental Health, Harvard School of Public Health, Boston, MA, USA, ²Department of Medicine, The Channing Laboratory, Brigham and Women's Hospital and Harvard Medical School, Boston, MA, USA

Key words: Carbon dioxide; Infectious disease risk modeling; Wells–Riley equation; Basic reproductive number; Communicable disease control; Respiratory tract infections; Indoor air pollution.

Donald K. Milton
Associate Professor of Occupational and Environmental Health, Harvard School of Public Health, 665 Huntington Avenue, Boston, MA 02115-6021, USA
Tel.: 617 432 3324
Fax: 617 432 3441
e-mail: dmilton@hsph.harvard.edu

Received for review 16 January 2002.
Accepted for publication 28 December 2002.
© Indoor Air (2003)

Practical Implications

The likelihood of airborne transmission of infection indoors can be estimated using continuous CO₂ measurements and the risk equation developed in this paper without assuming that the concentration of an infectious agent has reached steady-state and without measuring the outdoor air supply rate or assuming that it remains constant over time.

Introduction

Person-to-person transmission of infectious agents through the recirculated air of modern office buildings is a potential source of significant morbidity (Fisk and Rosenfeld, 1997; Milton et al., 2000) and targeted for research funding by the US National Occupational Research Agenda (National Institute for Occupational Safety and Health, 1998). Accurate mathematical models of airborne infection are needed to aid in designing future epidemiologic studies, for estimating the public health impact of building design parameters, and for estimating risk such as from secondary transmission of biological warfare agents. The Wells–Riley equation (Barnhart et al., 1997; Catanzaro, 1982; Fennelly and Nardell, 1998; Nardell et al., 1991; Nicas, 2000; Riley and Nardell, 1989; Riley et al., 1978), which

requires knowledge of the outdoor air supply rate, is commonly used to compute risk of airborne infection. The outdoor air supply rate can be measured directly or estimated based on CO₂ measurements. A key assumption of this equation is that airborne infectious particles are droplet nuclei that remain suspended in air for long periods of time and that their concentration is at a steady-state level throughout the exposure.

Exhaled breath is the vehicle for release of airborne infectious particles. Exhaled breath contains almost 40,000 p.p.m. of CO₂ compared with approximately 350 p.p.m. in outdoor air. Because most buildings do not contain significant internal sources of CO₂, apart from occupants, we may consider CO₂ as a surrogate for exhaled breath. Thus, the fraction of inhaled air that has been exhaled previously by someone in the building (rebreathed fraction) is easily computed. Because



Experimental validation of local exhaust strategies for improved IAQ in aircraft cabins

Ryan K. Dygert*, Thong Q. Dang

Syracuse University, Syracuse, NY, USA

ARTICLE INFO

Article history:
Received 1 February 2011
Received in revised form
13 April 2011
Accepted 16 April 2011

Keywords:

Aircraft cabin
Indoor air quality
Local exhaust
Personal ventilation
Contaminant removal

ABSTRACT

This experimental study examines the effectiveness of using local exhaust to mitigate cross-contamination within an aircraft cabin. Results of a previous computational fluid dynamics (CFD) study indicate significant improvements over conventional cabin mixing air ventilation systems with an average decrease in passenger exposure to body-emitted contaminants upwards of 60% predicted. This is accomplished through the use of localized suction orifices placed near and around the source passengers which are designed to unobtrusively ingest the individual's thermal plume and exhaust it from the aircraft cabin before contaminants entrained in the plume can mix with the bulk air supply. To further test and validate the localized exhaust strategies already simulated through CFD, an extensive experimental tracer gas study has been conducted in a business-class cabin mockup and is presented here. Experimental results agree with earlier CFD work and show reductions in exposure to armpit-released contaminants of 30–60% using similar suction methodologies and up to 90% reduction with enhanced designs.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Recent interest in aircraft cabin air quality and related passenger health and safety is by no means lacking. A few examples of several recent studies focusing on the cabin environment include numerical and experimental investigations on cabin airflow [1,2], pollutant transport [3,4], ozone reaction chemistry [5,6], and alternate air distribution or personal ventilation (PV) systems [7–9]. It would seem, however, that while much attention is being paid to determining how and where contaminants travel in the cabin environment, few researchers are examining how to most effectively remove them to help minimize cross-contamination between passengers. While studies on cabin PV systems show promise in delivering fresh air directly to a passenger's seated location, they do not address the air quality in the aisles to which flight attendants are exposed, nor do they handle the general spread of contaminants throughout the cabin. This study is therefore aimed at mitigating the spread of odors and contaminants (bio-effluents) in cases of high-occupant density seating by removing them directly from the Personal Micro-Environment (P_μE) of the source occupant before they can enter the surrounding bulk airflow.

Most aircraft cabin ventilation designs currently use a 50% mix of fresh and recirculated, filtered air and supply approximately

8–10 l/s per person [2,4,7]. In order to make the most efficient use of the air supply at hand, the 50% of cabin air that is exhausted from the aircraft should remove with it as much contaminant from within the cabin as possible. This will thereby reduce cross-contamination among passengers and improve overall air quality. Accordingly, this study examines the use of localized suction orifices near and around the source occupant to unobtrusively ingest the individual's thermal plume and exhaust it from the aircraft cabin before contaminants entrained in the plume can significantly mix with the bulk airflow.

In a recent computational fluid dynamics (CFD) study, Dygert & Dang [10] demonstrated significant reductions in passenger exposure to neighboring body-emitted contaminants through the use of localized suction orifices placed above the shoulders and/or heads of passengers seated in a coach-class aircraft cabin. Fig. 1 shows part of the wide-body aircraft cabin computational domain used by Dygert & Dang [10] and the two forms of localized suction studied, termed "seat-back" and "overhead" suction. In the case of seat-back suction, conventional seats are mimicked with the orifices placed directly in the seat-back above the shoulders of seated, anatomically correct passengers. When overhead suction is employed, so-called "privacy shells" are added to the seats to accommodate the integration of a suction slot above the head of the passenger; these privacy shells are similar to those used in some business and first-class seats (e.g. South African Airways – see lower right of Fig. 1). It is noted that local contaminant removal strategies have also been

* Corresponding author.
E-mail address: rkydygert@syr.edu (R.K. Dygert).



An advanced numerical model for the assessment of airborne transmission of influenza in bus microenvironments

Shengwei Zhu^{a,b,*}, Jelena Srebric^b, John D. Spengler^a, Philip Demokritou^{a,**}

^aDepartment of Environmental Health, Harvard School of Public Health, Landmark Center, Room 421 West, 401 Park Dr., Boston, MA 02215, USA

^bDepartment of Architectural Engineering, The Pennsylvania State University, 104 Engineering Unit A, University Park, PA 16802, USA

ARTICLE INFO

Article history:
Received 29 January 2011
Received in revised form
21 April 2011
Accepted 8 May 2011

Keywords:

Computational fluid dynamics (CFD)
Wells–Riley equation
Airborne infection transmission
Bus microenvironment
Mixing ventilation
Displacement ventilation

ABSTRACT

A CFD-based numerical model was integrated with the Wells–Riley equation to numerically assess the risk of airborne influenza infection in a popular means of public transportation, e.g. the bus microenvironment. Three mixing ventilation methods, which are widely used in current bus configurations, and an alternative displacement ventilation method were numerically assessed in terms of their ability to limit the risk of airborne influenza infection. Furthermore, both the non air-recirculation and air-recirculation with filtration ventilation modes were investigated in terms of the influenza infection probability. According to the simulation results, air-recirculation mode with high efficiency filtration was found to cause almost the same infection risk as non air-recirculation mode (100% outdoor air supply), which indicated a potential benefit of filtration in reducing the infection risk. Additionally, for the commonly used mixing ventilation methods, air distribution method, location of return/exhaust opening and seat arrangement affected the airborne transmission of influenza between passengers. The displacement ventilation method was found to be more effective in limiting the risk of airborne infection. Overall, the developed numerical model can provide insights into how the micro-environmental conditions affect airborne infection transmission in buses. This numerical model can assist in developing effective control strategies related to airborne transmitted diseases for other frequently used public transportation systems, such as trains and airplanes.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

In recent years, it became apparent that airborne transmitted diseases such as Tuberculosis (TB), Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS), Avian Influenza and Swine Influenza (H1N1) are on a rise and may impose serious public health and financial burdens to our society. For example, the H1N1 pandemic spread rapidly around the world and caused as of July, 2010 over 18,366 deaths [1] with its full impact remained to be seen. Therefore, there is a need to further study and understand the transmission of airborne infectious diseases in indoor environments, especially in microenvironments with high occupant density such as the public transportation means (e.g. buses, trains, airplanes).

Many studies of airborne transmission of respiratory infectious diseases focused on various indoor microenvironments, such as hospital ward [2] and aircraft cabin [3–6], and primarily emphasized the mechanisms of airborne transmission and the development of efficient infection-control strategies. Bus systems are a popular mean of public transportation around the world [7]. A number of studies on bus microenvironments have reported serious indoor environment quality (IEQ) problems with many indoor pollutants at higher concentration levels than outdoors. A Hong Kong-based field study found that CO₂ concentration levels could be up to 10 times higher than outdoor concentrations under overcrowded conditions in the bus system [7]. Similarly, a field study in Boston, MA (USA) found that CO₂ concentration levels were elevated and greatly affected by occupancy rates [8], which is an indication of insufficient ventilation in the bus microenvironments. The insufficient ventilation and overcrowded conditions in the bus microenvironments, which unfortunately are the norm in many cities around the world, may increase the risk of airborne transmission of various infectious diseases. Therefore, alternate control strategies need to be developed and employed in order to protect the public from airborne transmitted infectious diseases.

* Corresponding author. Department of Architectural Engineering, The Pennsylvania State University, 104 Engineering Unit A, University Park, PA 16802, USA.
Tel.: +1 814 863 8313; fax: +1 814 863 4789.

** Corresponding author. Tel.: +1 617 384 8847; fax: +1 617 384 8819.
E-mail addresses: SZHU@hsph.harvard.edu (S. Zhu), PDEMOKRI@hsph.harvard.edu (P. Demokritou).



Probabilistic indoor transmission modeling for influenza (sub)type viruses

Szu-Chieh Chen^{a,b}, Chung-Min Liao^{c,*}

^a Department of Public Health, Chung Shan Medical University, Taichung, Taiwan 40242, ROC

^b Department of Family and Community Medicine, Chung Shan Medical University Hospital, Taichung, Taiwan 40242, ROC

^c Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, ROC

Accepted 29 September 2009
Available online 7 October 2009

KEYWORDS

Influenza;
Indoor transmission;
Infection;
Modeling;
Vaccine

Summary Objectives: To use a probability based transmission modeling approach to examine the influenza risk of infection virus in indoor environments. This was based on 10 years of data gathered from influenza-like illness sentinel physician and laboratory surveillance, and experimental viral shedding data in Taiwan.

Methods: We integrated sentinel physician-reported cases and positive rates of influenza A (H1N1), A (H3N2), influenza B, and respiratory syncytial virus in Taiwan using the Wells–Riley mathematical model. This model incorporates environmental factors such as room ventilation and breathing rates. We also linked vaccine match rate with related transmission estimations to predict the controllable potential using a control model characterized by basic reproduction number (R_0) and proportion of asymptomatic infections (θ).

Results: A quantitative framework was developed to better understand the infection risk and R_0 estimates of A (H1N1), A (H3N2), and B viruses. The viral concentration in human fluid was linked successfully with quantum generation rates to estimate virus-specific infection risks. Our results revealed that A (H3N2) virus had a higher transmissibility and uncontrollable potential than the A (H1N1) and B viruses.

Conclusions: Probabilistic transmission model can incorporate virus-specific data on experimental viral shedding, long-term sentinel physician and laboratory surveillance to predict virus-specific infection risks in Taiwan.

© 2009 The British Infection Society. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Introduction

Influenza is one of the most important infectious diseases affecting humans. The continuous threat of pandemic

human influenza pandemics suggests an urgent need to conduct long-term year-round viral surveillance of individual (sub)types in order to improve our understanding of the human influenza.¹ In the past, reliable estimates based on probabilistic transmission modeling for influenza virus

* Corresponding author. Tel.: +886 2 23634512; fax: +886 2 23626433.
E-mail address: cmliao@ntu.edu.tw (C.-M. Liao).

Review Article

Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings

Hua Qian, Xiaohong Zheng

School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China

Contributions: (I) Conception and design: H Qian; (II) Administrative support: H Qian; (III) Provision of study materials or patients: All authors; (IV) Collection and assembly of data: All authors; (V) Data analysis and interpretation: All authors; (VI) Manuscript writing: All authors; (VII) Final approval of manuscript: All authors.

Correspondence to: Hua Qian, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China. Email: qianh@seu.edu.cn.

Abstract: The emergence of respiratory diseases, i.e., severe acute respiratory syndrome (SARS) epidemic in 2003, H1N1 influenza epidemic in 2011 and Middle East respiratory syndrome (MERS) outbreak, reiterated the significance of ventilation in buildings. The role of ventilation in removing exhaled airborne bio-aerosols and preventing cross infections has been multidisciplinary extensively studied after the SARS outbreak in 2003. The characteristics of droplet-borne, short-range airborne and long-range airborne transmission of infectious diseases were identified. Increasing ventilation rate can effectively reduce the risk of long-range airborne transmission, while it may be of little useful in preventing the droplet-borne transmission. To maintain the airflow direction from clean cubicles to dirty cubicles is an effective way to prevent the cross infection between cubicles, which is widely used in hospital isolation rooms. Field measurements showed that wrong air flow direction was due to poor construction quality or maintenance. The impacts of different airflow patterns on removing large droplets and fine droplet nuclei were discussed. Some new concepts in general ventilation systems and local personalized equipment were also introduced. This review updates current knowledge of the airborne transmission of pathogens and the improvement of ventilation efficiency concerning the infection prevention.

Keywords: Airborne diseases; ventilation; exhaled; bio-aerosols

Submitted Jun 12, 2017. Accepted for publication Jan 04, 2018.

doi: 10.21037/jtd.2018.01.24

View this article at: <http://dx.doi.org/10.21037/jtd.2018.01.24>

Introduction

The possible serious threat of airborne infection in buildings to human health has been reiterated by the 2003 worldwide severe acute respiratory syndrome (SARS) epidemic (1), the growing potential threat of bio-terror attack through deliberately releasing agents such as anthrax or smallpox (2), H1N1 influenza epidemic in 2011 (3) and MERS in 2013 (4). The growing urbanization, the worsening overcrowded conditions in modern large cities and the rapidly growing worldwide transport networks are possibly making the transmission of airborne spread infectious diseases faster (5). Airborne transmission mostly occurred in indoor environments (5,6), where most people

spend over 90% of their time.

Ventilation is recognized as an important factor influencing the transmission of airborne diseases. The significance of ventilation was also reemphasized by the 2003 worldwide SARS outbreak in 2003 worldwide and in particular a super spreading event in a hospital in Hong Kong. The investigation of the largest nosocomial SARS outbreak in Hong Kong in the Prince of Wales Hospital by Li *et al.* (2005) (7) and Tomlinson and Cockram (2003) (8) suggested that an inefficient ventilation system very probably caused the spread of the virus in the Ward 8A. Gao concluded that increasing ventilation rates in classrooms, offices, and homes is a relatively effective strategy for controlling airborne diseases in a large

Esempi di pubblicazioni scientifiche



23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering
December 6-11, 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brazil



DTU Library

RISK ASSESSMENT FOR AIRBORNE INFECTIOUS DISEASES BETWEEN NATURAL VENTILATION AND A SPLIT-SYSTEM AIR CONDITIONER IN A UNIVERSITY CLASSROOM

Marcelo Pereira
Department of Refrigeration and Air Conditioning, Federal Institute of Education, Science and Technology of Santa Catarina, Brazil.
International Laboratory for Air Quality and Health, Queensland University of Technology, Australia
marcelo.pereira@ifsc.edu.br

Rogério Vilain
Department of Refrigeration and Air Conditioning, Federal Institute of Education, Science and Technology of Santa Catarina, Brazil.
vilain@ifsc.edu.br

Arlindo Tribess
Department of Mechanical Engineering, University of São Paulo, Brazil
atribess@usp.br

Lidia Morawska
International Laboratory for Air Quality and Health, Queensland University of Technology, Australia
l.morawska@qut.edu.au

ABSTRACT

Indoor air quality is a critical factor in the classroom due to high people concentration in a unique space. Indoor air pollutant might increase the chance of both long and short-term health problems among students and staff, reduce the productivity of teachers and degrade the student's learning environment and comfort. Adequate air distribution strategies may reduce risk of infection in classroom. So, the purpose of air distribution systems in a classroom is not only to maximize conditions for thermal comfort, but also to remove indoor contaminants. Natural ventilation has the potential to play a significant role in achieving improvements in IAQ. The present study compares the risk of airborne infection between Natural Ventilation (opening windows and doors) and a Split-System Air Conditioner in a university classroom. The Wells-Riley model was used to predict the risk of indoor airborne transmission of infectious diseases such as influenza, measles and tuberculosis. For each case, the air exchange rate was measured using a CO₂ tracer gas technique. It was found that opening windows and doors provided an air exchange rate of 2.3 air changes/hour (ACH), while with the Split System it was 0.6 ACH. The risk of airborne infection ranged between 4.24 to 30.86 % when using the Natural Ventilation and between 8.99 to 43.19% when using the Split System. The difference of airborne infection risk between the Split System and the Natural Ventilation ranged from 47 to 56%. Opening windows and doors maximize Natural Ventilation so that the risk of airborne contagion is much lower than with Split System.

Keywords: Indoor air quality, Airborne infection, Natural Ventilation, Split system, Air changes/hour

INTRODUCTION

The general purpose of ventilation in buildings is to provide healthy air for breathing by both diluting the pollutants originating in the building and removing the pollutants from it. A higher ventilation rate can provide a higher dilution capability and consequently potentially reduce the risk of airborne infections (WHO, 2009).

Dilution ventilation with fresh air becomes critical for airborne infection control whenever people share air space, such as a classroom. Schools present a much higher occupancy than many other buildings, for example, there are four times as many occupants per unit of area than in office buildings (Santamouris et al, 2008).

Classrooms and other school spaces must be ventilated to remove odors and other pollutants. Investigations at schools often use the CO₂ concentration in classrooms as a measure of ventilation (Jones et al, 2008). Quantitative links between carbon dioxide, ventilation and occupant performance have been established (Seppänen and Fisk, 2002). Carbon dioxide, which in itself may not be a direct cause of poor indoor air quality, but is recognized as a surrogate indicator of indoor air quality and ventilation rates (Seppänen and Fisk, 2002; Jones et al, 2008). In general, a larger peak difference between indoor and outdoor CO₂ concentration indicates a small ventilation rate per person. In urban

Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: a review

Ai, Z.T.; Melikov, Arsen Krikor

Published in:
Indoor Air

Link to article, DOI:
[10.1111/ina.12465](https://doi.org/10.1111/ina.12465)

Publication date:
2018

Document Version
Peer reviewed version

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Ai, Z. T., & Melikov, A. K. (2018). Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: a review. *Indoor Air*, 28(4), 500-524. <https://doi.org/10.1111/ina.12465>



WHO Publication/Guidelines

Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings

Edited by:
**James Atkinson, Yves Chartier,
Carmen Lúcia Pessoa-Silva,
Paul Jensen, Yuguo Li
and Wing-Hong Seto**

Defining the sizes of airborne particles that mediate influenza transmission in ferrets

Jie Zhou^{a,1}, Jianjian Wei^{b,1}, Ka-Tim Choy^a, Sin Fun Sia^a, Dewi K. Rowlands^c, Dan Yu^a, Chung-Yi Wu^d, William G. Lindsley^e, Benjamin J. Cowling^a, James McDevitt^f, Malik Peiris^{a,2}, Yuguo Li^b, and Hui-Ling Yen^{a,2}

^aSchool of Public Health, Li Ka Shing Faculty of Medicine, The University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China; ^bDepartment of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China; ^cLaboratory Animal Services Centre, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China; ^dGenomics Research Center, Academia Sinica, Taiwan, Republic of China; ^eAllergy and Clinical Immunology Branch, Health Effects Laboratory Division, National Institute for Occupational Safety and Health, Morgantown, WV 26505; and ^fDepartment of Environmental Health, Harvard School of Public Health, Boston, MA 02115

Contributed by Malik Peiris, January 16, 2018 (sent for review October 2, 2017; reviewed by Kanta Subbarao and Terrence M. Tumpey)

Epidemics and pandemics of influenza are characterized by rapid global spread mediated by non-mutually exclusive transmission modes. The relative significance between contact, droplet, and airborne transmission is yet to be defined, a knowledge gap for implementing evidence-based infection control measures. We devised a transmission chamber that separates virus-laden particles by size and determined the particle sizes mediating transmission of influenza among ferrets through the air. Ferret-to-ferret transmission was mediated by airborne particles larger than 1.5 μm , consistent with the quantity and size of virus-laden particles released by the donors. Onward transmission by donors was most efficient before fever onset and may continue for 5 days after inoculation. Multiple virus gene segments enhanced the transmissibility of a swine influenza virus among ferrets by increasing the release of virus-laden particles into the air. We provide direct experimental evidence of influenza transmission via droplets and fine droplet nuclei, albeit at different efficiency.

influenza virus | droplet transmission | airborne transmission | airborne particles | ferrets

Influenza epidemics and pandemics are characterized by abrupt increases in cases reported concurrently at different geographic regions as a result of its rapid global spread, resulting in 250,000–500,000 deaths during epidemics and 0.2–50 million deaths during pandemics (1–3). Influenza can potentially be transmitted from person to person by three modes: contact transmission, in which infectious secretions are transferred directly or indirectly via fomites; droplet transmission, in which respiratory fluid-containing particles larger than 5 μm travel ballistically through the air and deposit onto mucous membranes within 3 ft as a result of gravity; and airborne transmission, in which dried particles (i.e., droplet nuclei) smaller than 5 μm remain suspended in air and disperse over long distances and are inhaled and deposited in the respiratory tract. Although influenza is thought to be transmitted via these non-mutually exclusive modes, the relative importance of each is unclear. It is especially challenging to delineate the relative significance of droplets vs. fine droplet nuclei in mediating influenza transmission in epidemiological studies, as the exposure history often cannot be clearly determined (4–6). Precautions against droplet transmission include face masks and eye protection during close contact with a patient, whereas airborne precautions include single-patient negative pressure rooms and respiratory protection such as the use of an N95 respirator (7). Recommendation on influenza infection control measures in health care and community settings are formulated despite major knowledge gaps in the relative significance of the different transmission modes.

Ferrets are naturally susceptible to influenza infection (8) and support influenza transmission via direct contact (i.e., with cohoused donors and recipients) or by respiratory droplets (i.e., with donors and recipients housed in cages separated by varying distances) under the experimental setting of continuous exposure (9, 10). As influenza viruses with sustained human-to-human transmissibility (e.g., human seasonal or pandemic influenza viruses) are transmissible among

ferrets via respiratory droplets, ferrets are often used to assess the pandemic risk of zoonotic influenza viruses (11). However, the conventional experimental settings cannot clarify the relative transmission efficiency of airborne particles of different sizes that mediate droplet and airborne transmission. To address this knowledge gap, we developed a transmission chamber capable of separating influenza virus-laden particles into specific size ranges by the application of impactors. We report an experimental study that delineated the size of airborne particles mediating influenza transmission among ferrets.

Results

Airborne Transmission of Influenza Among Ferrets Was Mediated by Virus-Laden Particles Larger than 1.5 μm . A transmission chamber capable of separating airborne particles into specific size ranges by the application of impactors was constructed. Our system captures particles larger than the desired cutoff size via inertial impaction while allowing smaller particles to remain in the air stream. The donor chamber is connected to the recipient chamber with an impactor (Fig. S1A) inside a class II biosafety cabinet (BSC);

Significance

Emerging respiratory pathogens pose significant public health threats as a result of their potential for rapid global spread via multiple non-mutually exclusive modes of transmission. The relative significance of contact, droplet, and airborne transmission for many respiratory pathogens remains a knowledge gap, and better understanding is essential for developing evidence-based measures for effective infection control. Here, we describe and evaluate a transmission chamber that separates virus-laden particles in air by size to study airborne particles that mediate influenza transmission in ferrets. Our results provide direct experimental evidence of influenza transmission via droplets and fine droplet nuclei, albeit at different efficiency. This transmission device can also be applied to elucidate the mode of transmission of other respiratory pathogens.

Author contributions: M.P., Y.L., and H.-L.Y. designed research; J.Z., J.W., K.-T.C., S.F.S., D.Y., and H.-L.Y. performed research; D.K.R., C.-Y.W., W.G.L., and J.M. contributed new reagents/analytic tools; J.Z., J.W., D.Y., C.-Y.W., W.G.L., B.J.C., J.M., M.P., Y.L., and H.-L.Y. analyzed data; J.Z., J.W., M.P., and H.-L.Y. wrote the paper; and J.Z., J.W., Y.L., and H.-L.Y. devised the transmission chamber.

Reviewers: K.S., WHO Collaborating Centre for Reference and Research on Influenza, The Peter Doherty Institute for Infection and Immunity, and T.M.T., Centers for Disease Control and Prevention.

Conflict of interest statement: B.J.C. received research funding from Sanofi. The other authors declare no conflict of interests.

This open access article is distributed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License 4.0 (CC BY-NC-ND).

¹J.Z. and J.W. contributed equally to this work.

²To whom correspondence may be addressed. Email: malik@hku.hk or hyen@hku.hk.

This article contains supporting information online at www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1716771115/-DCSupplemental.

Published online February 20, 2018.

Esempi di pubblicazioni scientifiche

Airborne Infection

TRANSMISSION AND CONTROL

RICHARD L. RILEY, M.D.

*Professor of Environmental Medicine,
The Johns Hopkins School of Hygiene and Public Health,
and*

*Associate Professor of Medicine,
The Johns Hopkins School of Medicine,
Baltimore, Maryland*

FRANCIS O'GRADY, M.D., M. Sc.

*Assistant Pathologist, Bland-Sutton Institute of Pathology,
The Middlesex Hospital, London
Lately, Chief, Air Hygiene Research Unit, Veterans Administration Hospital,
Baltimore, Maryland
and*

*Assistant Professor of Environmental Medicine,
The Johns Hopkins School of Hygiene and Public Health,
Baltimore, Maryland*

NEW YORK THE MACMILLAN COMPANY

COMMUNICABLE DISEASE CENTER
LIBRARY
ATLANTA 22, GEORGIA



Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event

Journal:	<i>Indoor Air</i>
Manuscript ID	Draft
Manuscript Type:	Original Article
Date Submitted by the Author:	n/a
Complete List of Authors:	Miller, Shelly; University of Colorado, Mechanical Engineering; Nazaroff, William; University of California, Civil & Environmental Engineering Jimenez, Jose; University of Colorado Boulder, Chemistry and CIRES; Dr. Boerstra, Atze; BBA Indoor Environmental Consultancy, Buonanno, Giorgio; University of Cassino, Dancer, Stephanie; NHS Lanarkshire, Microbiology Kurnitski, Jarek Marr, Linsey; Virginia Tech, Civil and Environmental Engineering; Morawska, Lidia; Queensland University of Technology, International Laboratory for Air Quality and Health Noakes, Catherine; University of Leeds, School of Civil Engineering
Keywords:	aerosol transmission, infectious disease, ventilation, virus, pandemic, risk

SCHOLARONE™
Manuscripts

Esempi di pubblicazioni scientifiche di italiani

Environment International 141 (2020) 105794

Contents lists available at ScienceDirect

Environment International

journal homepage: www.elsevier.com/locate/envint



Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment

G. Buonanno^{a,b,*}, L. Stabile^a, L. Morawska^b

^a Department of Civil and Mechanical Engineering, University of Cassino and Southern Lazio, Cassino, FR, Italy

^b International Laboratory for Air Quality and Health, Queensland University of Technology, Brisbane, Qld, Australia



ARTICLE INFO

Handling Editor: Xavier Querol

Keywords:

SARS-CoV-2 (CoVID19)

Virus airborne transmission

Indoor

Ventilation

Coronavirus

Viral load

ABSTRACT

Airborne transmission is a pathway of contagion that is still not sufficiently investigated despite the evidence in the scientific literature of the role it can play in the context of an epidemic. While the medical research area dedicates efforts to find cures and remedies to counteract the effects of a virus, the engineering area is involved in providing risk assessments in indoor environments by simulating the airborne transmission of the virus during an epidemic. To this end, virus air emission data are needed. Unfortunately, this information is usually available only after the outbreak, based on specific reverse engineering cases. In this work, a novel approach to estimate the viral load emitted by a contagious subject on the basis of the viral load in the mouth, the type of respiratory activity (e.g. breathing, speaking, whispering), respiratory physiological parameters (e.g. inhalation rate), and activity level (e.g. resting, standing, light exercise) is proposed.

The results showed that high quanta emission rates (> 100 quanta h^{-1}) can be reached by an asymptomatic infectious SARS-CoV-2 subject performing vocalization during light activities (i.e. walking slowly) whereas a symptomatic SARS-CoV-2 subject in resting conditions mostly has a low quanta emission rate (< 1 quantum h^{-1}).

The findings in terms of quanta emission rates were then adopted in infection risk models to demonstrate its application by evaluating the number of people infected by an asymptomatic SARS-CoV-2 subject in Italian indoor microenvironments before and after the introduction of virus containment measures. The results obtained from the simulations clearly highlight that a key role is played by proper ventilation in containment of the virus in indoor environments.

1. Introduction

Expiratory human activities generate droplets, which can also carry viruses (e.g. influenza, tuberculosis, measles and SARS-CoV (Sze To and Chao, 2010; Watanabe et al., 2010)), through the atomization processes occurring in the respiratory tract when sufficiently high speeds are reached (Chao et al., 2009; Morawska, 2006). Indeed, during breathing, coughing, sneezing or laughing, toques of liquid originating from different areas of the upper respiratory tract are drawn out from the surface, pulled thin, and broken into columns of droplets of different sizes (Hickey and Mansour, 2019). The content of infectious agents expelled by an infected person depends, among other factors, on the location within the respiratory tract from which the droplets originated. In particular, air velocities high enough for atomization are produced when the exhaled air is forced out through some parts of the respiratory

tract which have been greatly narrowed. The front of the mouth is the site of narrowing and the most important site for atomization; since most droplets originate at the front of the mouth and to a lesser extent from the larynx (Johnson et al., 2011), the concentration of an infectious agent in the mouth (sputum) is representative of the concentration in the droplets emitted during the expiratory activities (Morawska, 2006). Thus, knowledge of the size and origin of droplets is important to understand transport of the virus via the aerosol route. Contrary to the findings of early investigations (Duguid, 1945; Jennison, 1942; Wells, 1934), subsequent studies involving optical particle detection techniques capable of measurements down to fractions of a micrometer suggested that the majority of these particles are in the sub-micrometer size range (Papineni and Rosenthal, 1997). More recently, the growing availability of higher temporal and spatial visualization methods using high-speed cameras (Tang et al., 2011),

Using a Mathematical Model to Evaluate the Efficacy of TB Control Measures

Laura Gammaitoni and Maria Clara Nucci
University of Perugia, Perugia, Italy

We evaluated the efficacy of recommended tuberculosis (TB) infection control measures by using a deterministic mathematical model for airborne contagion. We examined the percentage of purified protein derivative conversions under various exposure conditions, environmental control strategies, and respiratory protective devices. We conclude that environmental control cannot eliminate the risk for TB transmission during high-risk procedures; respiratory protective devices, and particularly high-efficiency particulate air masks, may provide nearly complete protection if used with air filtration or ultraviolet irradiation. Nevertheless, the efficiency of these control measures decreases as the infectivity of the source case increases. Therefore, administrative control measures (e.g., identifying and isolating patients with infectious TB) are the most effective because they substantially reduce the rate of infection.

After decades of steady decline and a subsequent relaxation of infection control practices in health-care facilities, the number of tuberculosis (TB) cases has been increasing dramatically in the United States (1) and Western Europe (2) since 1985; the increase is due to human immunodeficiency virus (HIV) infection, immigration, poverty, homelessness, and drug addiction.

Epidemiologic studies have shown that primary pulmonary TB is caused by inhaling the tubercle bacillus in a droplet nucleus form (3). Airborne contagion is crucial in the indoor transmission of all respiratory infections from person to person (4,5). Infective persons may contaminate the air by coughing, sneezing, and spitting (4,5), which generate a large number of small respiratory droplets that evaporate almost instantly into small droplet nuclei, disperse into the environment, and implant themselves in the lung when inhaled (4). Droplet nuclei have a leading role in airborne contagion (3-5).

Outbreaks of TB have been reported from prisons, nursing homes, residential centers for HIV-infected persons, urban homeless shelters, aircraft, schools, and bars. All outbreaks occurred under crowded living conditions with prolonged close exposure to an infectious person.

Address for correspondence: Maria Clara Nucci, Dipartimento di Matematica, Università di Perugia, 06123 Perugia, Italy; fax: 011-39-75-585-5024; e-mail: nucci@unipg.it.

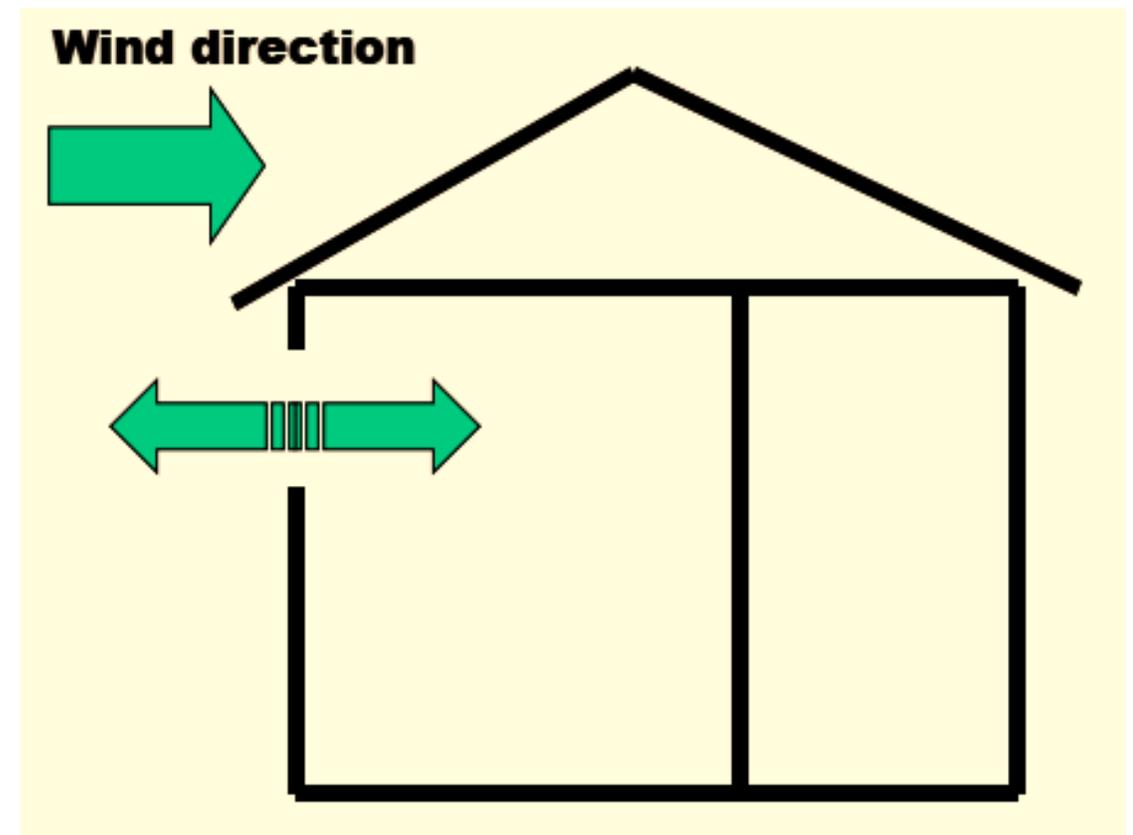
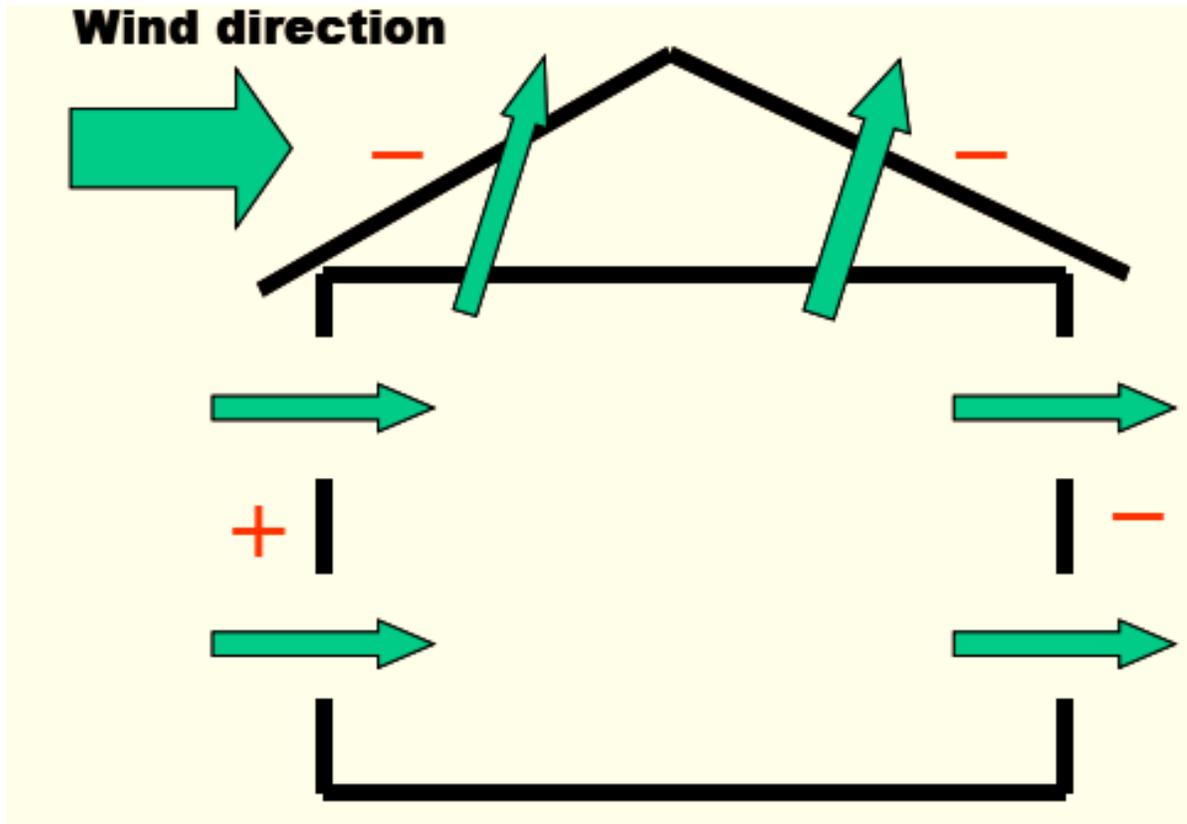
Nosocomial TB transmission is also associated with cough-generating procedures (6), bronchoscopy (7), endotracheal intubation and suctioning (8), open abscess irrigation (9), and autopsy (10). Workers involved in such procedures are at high and increasing risk for TB (11) because of the resurgence of the disease, the emergence of multidrug-resistant (MDR) strains causing outbreaks in hospitals among patients and health-care workers, and compromised TB control due to decreased funding of health-care agencies responsible for TB control.

After studying hospital outbreaks that resulted in TB transmission to health-care workers, various authorities have recommended measures to prevent nosocomial TB transmission (12-15). The implementation of a TB infection control program requires risk assessment and development of a TB infection control plan including early identification, treatment, and isolation of infectious TB patients; effective engineering controls (environmental controls such as general ventilation, high-efficiency particulate air [HEPA] filters, or ultraviolet germicidal irradiation [UVGI]); the adoption of appropriate respiratory protection (surgical masks and particulate respirators such as HEPA masks); health-care worker TB training, education, counseling, and screening; and evaluation of the program's effectiveness (13). Several reviews of environmental control measures and respiratory protective

* Corresponding author at: Department of Civil and Mechanical Engineering, University of Cassino and Southern Lazio, Via G. Di Biasio 43, 03043 Cassino, FR, Italy.

E-mail address: buonanno@unicas.it (G. Buonanno).

LA VENTILAZIONE NATURALE



Ventilazione naturale – Movimento dell'aria

Il movimento dell'aria, necessario per la **ventilazione naturale**, può essere determinato quando si verificano una o più delle seguenti condizioni:

- Esiste una **differenza di pressione** fra l'esterno e l'interno dell'edificio;
- Esiste una **differenza di temperatura** fra zone diverse dell'edificio o fra una zona interna e l'esterno dell'edificio.

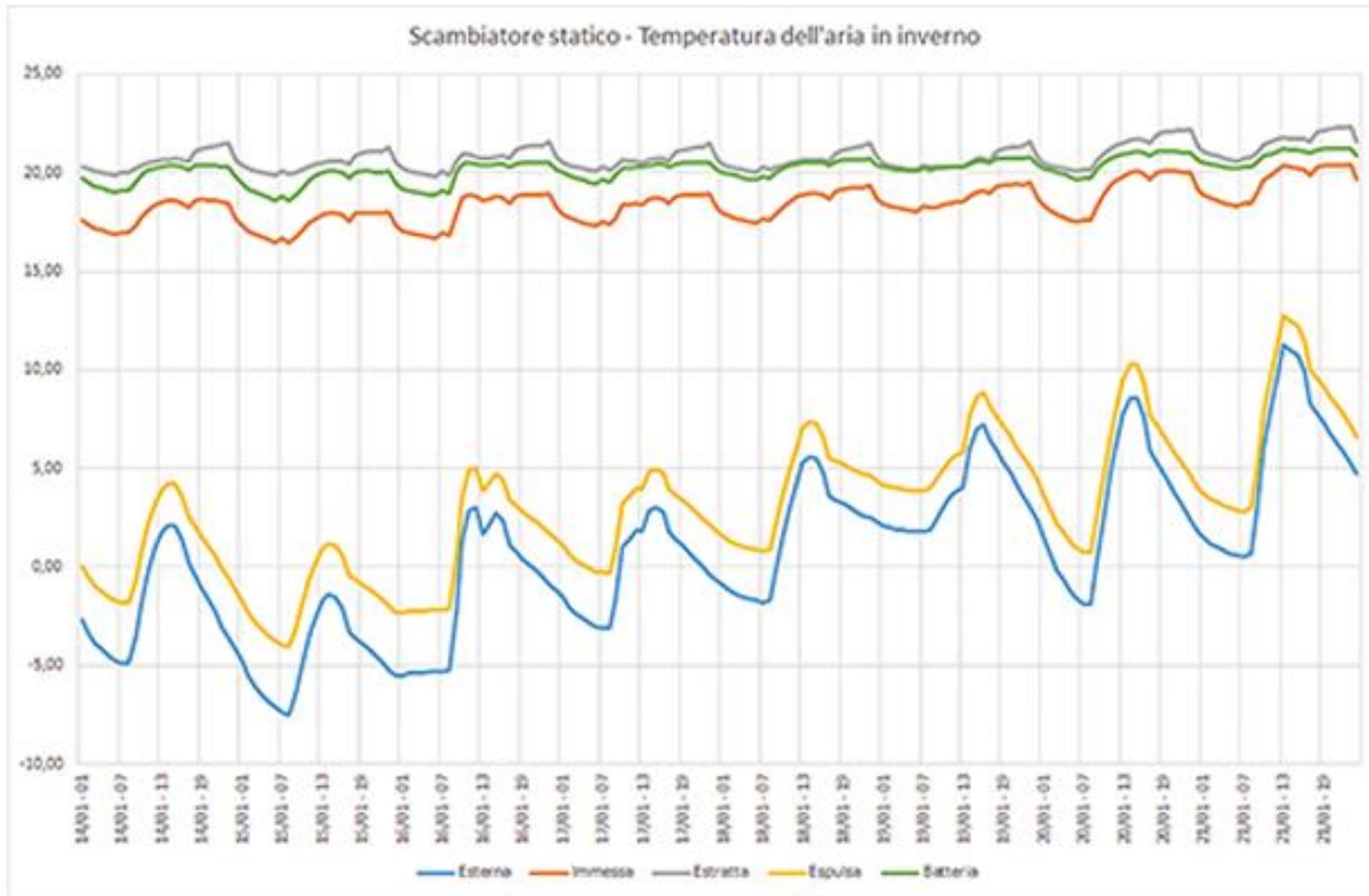
In pratica deve esistere uno o più **gradienti di potenziale** (*pressione e/o temperatura*) perché si inneschi un movimento convettivo.

Queste modalità, singole o combinate, sono sempre necessarie e per questo motivo il controllo della **ventilazione naturale** non è assoluto. Non possiamo controllare il **vento** né la **temperatura esterna** ma dobbiamo gestire le condizioni esterne così come si presentano nell'arco del giorno e dell'anno.

La natura delle variazioni di *pressione esterna* (**vento**) e di *temperatura* dipendono dal sito in cui si trova l'edificio ed hanno un andamento statistico caratteristico del luogo.

La **ventilazione naturale** risulta **non costante e non affidabile** proprio perché legata agli **andamenti statistici delle variabili ambientali esterne** (**clima**), contrariamente a quanto avviene per la **ventilazione meccanica** nella quale il movimento dell'aria è imposto da un dispositivo meccanico (*ventilatore*) perfettamente controllabile dall'esterno e indipendente dalla variabilità climatica esterna.

Ventilazione naturale – Variabilità clima esterno



Ventilazione naturale – UNI EN 15242

Nei casi nei quali non si richiedano elevate precisioni di calcolo si utilizzano **relazioni empiriche** o **metodi di calcolo semplificati** indicati dalle norme internazionali.

La **UNI EN 15242** ci dice come calcolare la portata d'aria Q (m^3/h) in un ambiente per effetto dell'apertura di una finestra da un solo lato. Si utilizza la relazione:

$$Q = 3.6 \cdot A_{FA} \left(0.01 + 0.001v_v^2 + 0.0035H_F \cdot |T_I - T_E| \right)^{0.5}$$

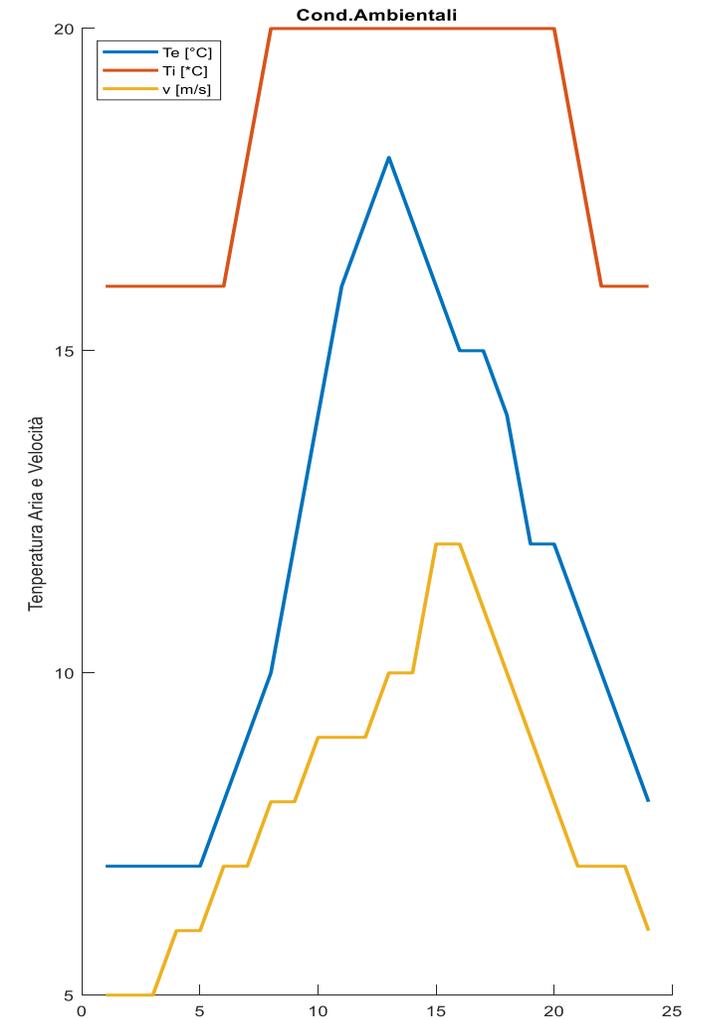
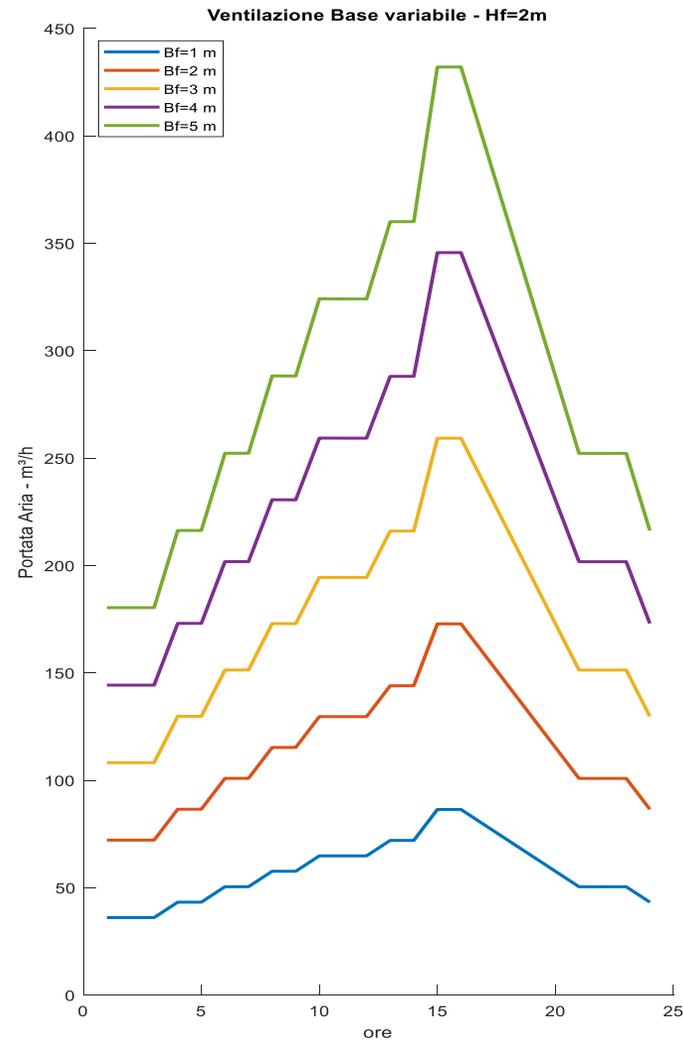
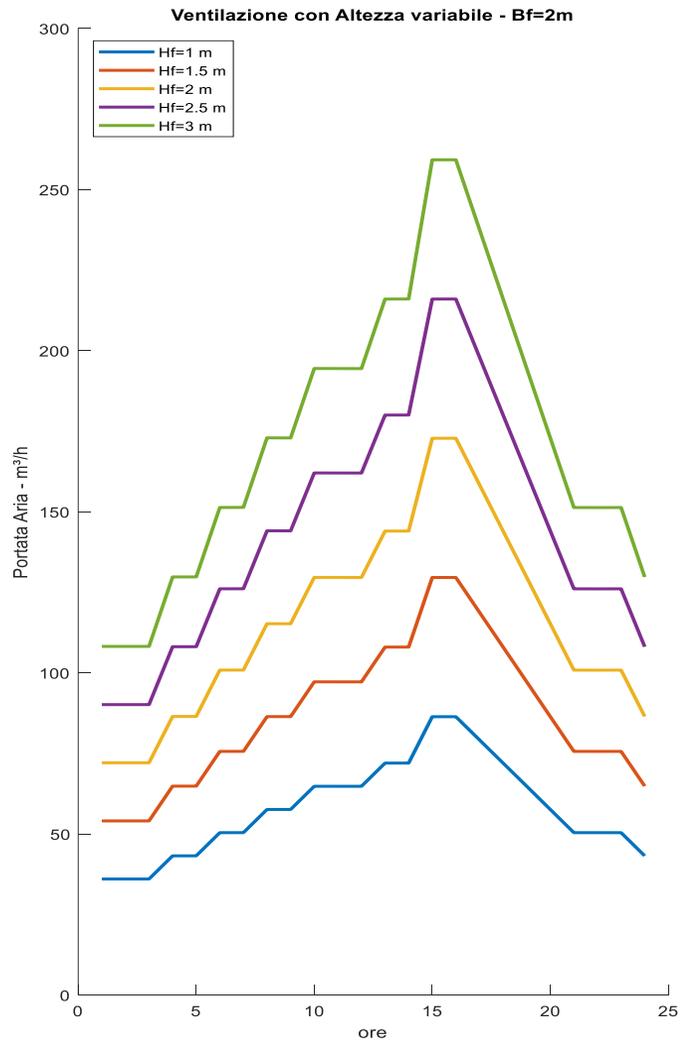
con:

- A_{FA} area apertura finestra in m^2
- v_v velocità del vento in m/s
- H_F altezza finestra in m
- T_E temperatura dell'aria esterna in $^{\circ}C$
- T_I temperatura dell'aria interna in $^{\circ}C$.

L'utilizzo di questa relazione richiede la conoscenza di **5 parametri** che durante il giorno **variano continuamente** e di conseguenza varia anche la portata d'aria di ventilazione.

Ventilazione naturale – UNI EN 15242

$H_f=2\text{ m}$, B_f variabile, con $B_f=2\text{ m}$ e H_f variabile e velocità del vento elevata.



Ventilazione naturale da spifferi nelle finestre e porte

Fessure e spifferi di porte e finestre sono responsabili di infiltrazioni d'aria che, oltre a costituire una dispersione termica ragguardevole che le norme impongono di ridurre ed eliminare, sono spesso (e in alcune regione del Sud quasi sempre) l'unico modo di avere **aria esterna fresca per il ricambio fisiologico**. Per calcolare l'infiltrazione d'aria complessiva q si utilizza la seguente formula adatta nel caso di infissi non classificati:

$$V_v = L \cdot a \cdot (p_e - p_i)^{0.66}$$

con i seguenti simboli:

- V_v = *infiltrazione d'aria complessiva o portata d'aria [m³/h];*
- L = *lunghezza totale delle battute di porte e finestre [m];*
- a = *coefficiente d'infiltrazione, vedi tabella sottostante;*
- p_e = *pressione esistente sulla facciata esposta al vento [Pa];*
- p_i = *pressione esistente sulla facciata protetta dal vento [Pa];*

Tipologia di finestra	Coefficiente di infiltrazione a
Finestra con riquadro in legno o in materiale plastico	0,54
Finestra con riquadro in metallo o combinato legno metallo, senza cure particolari	0,32
Finestre con riquadro in metallo e sigillature adeguate	0,22

Ventilazione naturale da spifferi nelle finestre e porte

La differenza di pressione $\Delta p = (p_e - p_i)$ è funzione della **pressione dinamica del vento** sulle facciate esposte e dell'angolo d'incidenza del vento sulle facciate.

Non è possibile calcolare con precisione la differenza di pressione tenendo conto di tutti i fattori, quindi si ricorre a semplificazioni introducendo categorie di vento e condizioni d'esposizioni standard come quelle riportate nella tabella seguente.

Condizioni locali del vento	Situazione	$\Delta p = (p_e - p_i)$	
		Insieme di alloggi, case a schiera	Case isolate
Normali (Valida per tutte le facciate)	Protetta	6	10
	Libera	14	22
	Esposta	24	40
Località ventose (Valida solo per le facciate esposte ai venti predominanti)	Protetta	14	18
	Libera	24	40
	Esposta	38	62

Ventilazione naturale – Osservazioni

Gli abachi riportati in precedenza sono relativi a due casi esempio particolari. Con T_i e T_e variabili, a dimensioni costanti della finestra, si osserva come la portata di ventilazione cambi ora per ora, anche se di poco, e che la **forzante principale è la velocità del vento**.

Se manteniamo **costante la velocità del vento** e facciamo variare l'altezza della finestra, a pari area, si osserva come la *portata di ventilazione cresca in modo considerevole con l'altezza della finestra*. Pertanto, ai fine di una migliore ventilazione naturale, è conveniente avere **finestre più alte e strette**. Questa caratteristica vale anche per l'illuminazione.

La variabilità reale della portata di ventilazione, cioè con T_i e T_e e v variabili contemporaneamente, rende assai **problematica la progettazione** degli edifici.

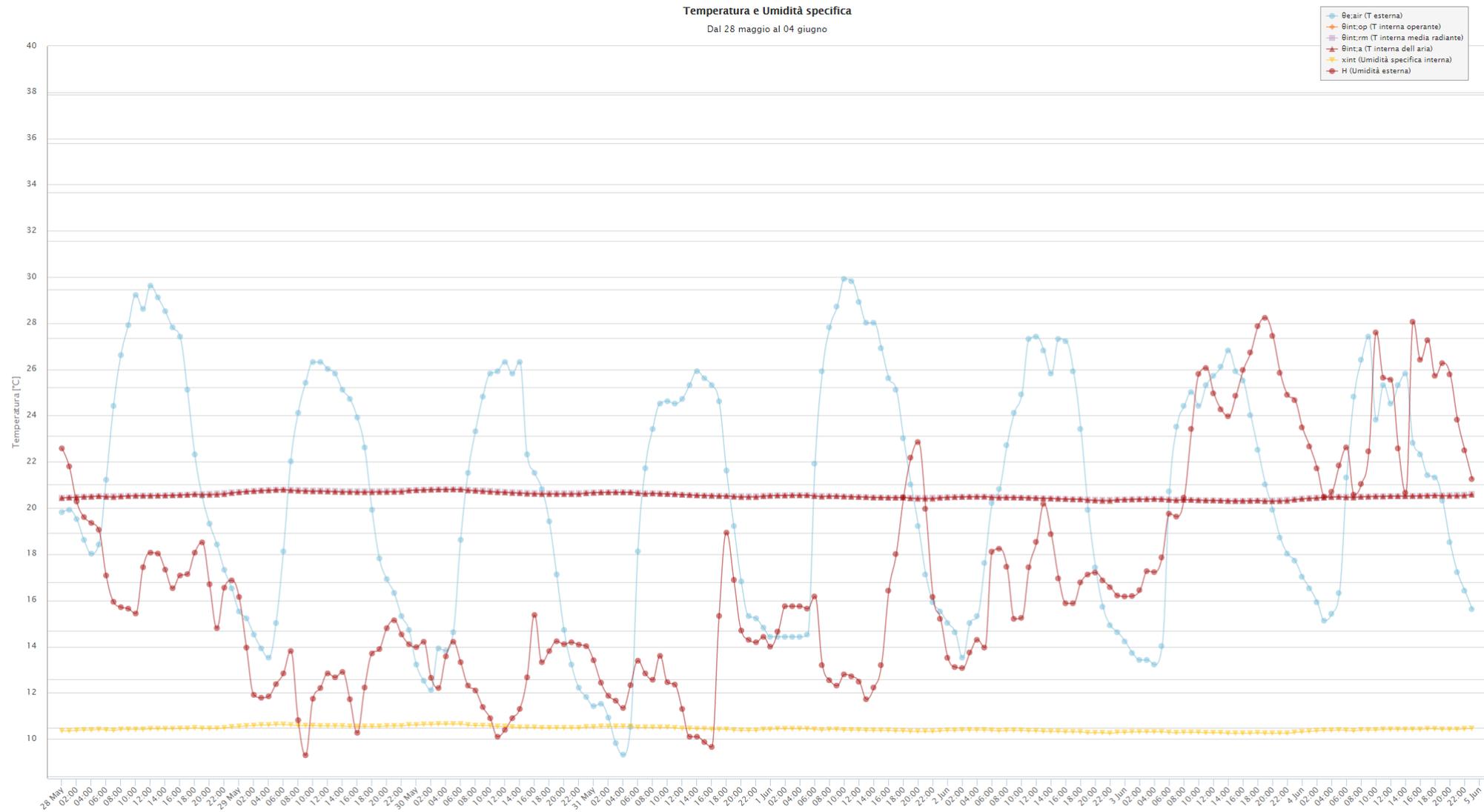
A questa considerazione si deve aggiungere anche la variabilità dell'umidità specifica associata agli scambi d'aria con l'esterno, come mostrato nell'abaco della figura seguente.

Oltre al carico termico **sensibile** occorre tenere conto anche del carico termico **latente** che, nelle giornate ventose e umide (ad esempio con lo *scirocco* in Sicilia orientale) possono variare sensibilmente rispetto alle condizioni ideali di progetto.

Sia le condizioni variabili esterne che l'impossibilità di controllare in alcun modo la portata d'aria di **ventilazione naturale** consigliano di utilizzare la **ventilazione meccanica controllata** sia per il controllo della qualità dell'aria che per il controllo dei consumi energetici (*filtrazione, ricircolo, free cooling, recupero termico*).

Ventilazione naturale – Osservazioni

Andamento della *Temperatura*, esterna ed interna (*termostata*), e dell'*umidità specifica*, interna ed esterna, per alcune settimane consecutive.



Ventilazione naturale – Solo differenza di Temperatura

La **UNI EN 16798 parte 7°** riporta una relazione valida per *basse velocità del vento* che permette di calcolare la portata di ventilazione naturale in modo semplificato in funzione solamente della differenza di temperatura fra interno ed esterno:

$$Q = 3.6 \cdot A_F \cdot 1.204 \cdot v_E \cdot \left(0.035 H_F \cdot |T_I - T_E| \right)^{0.5}$$

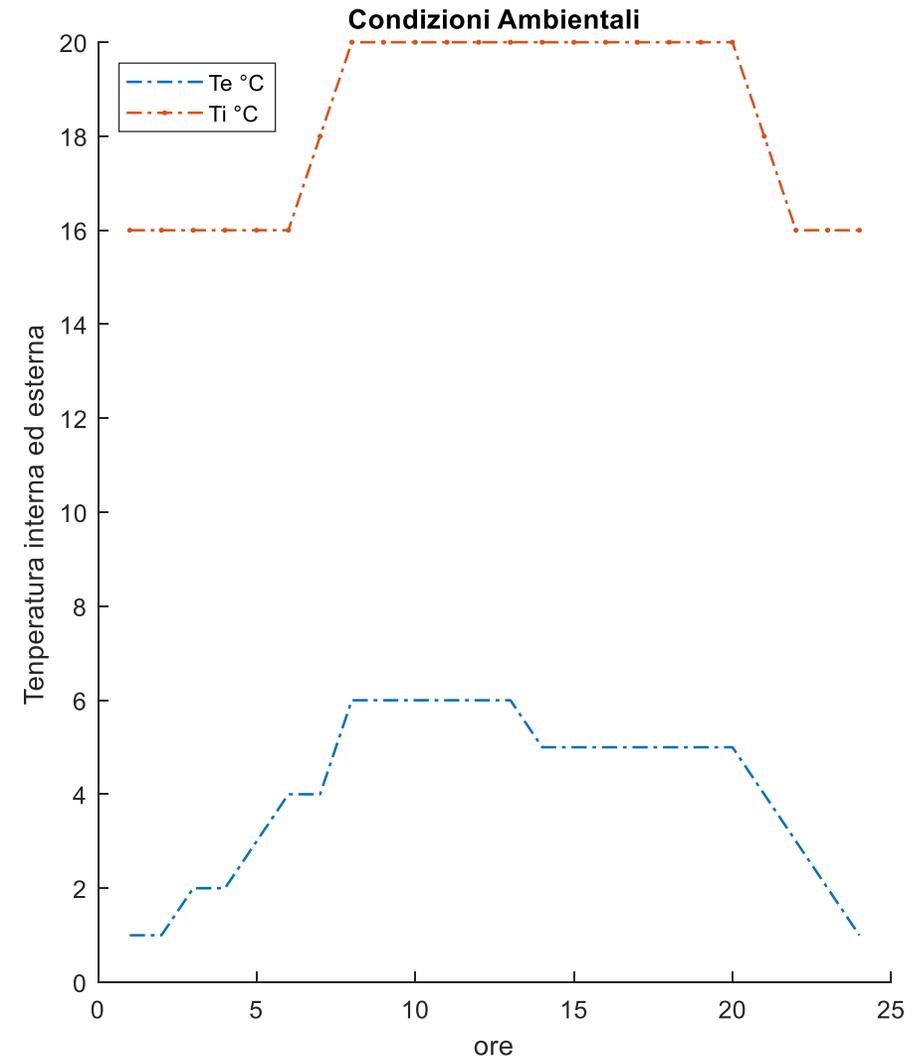
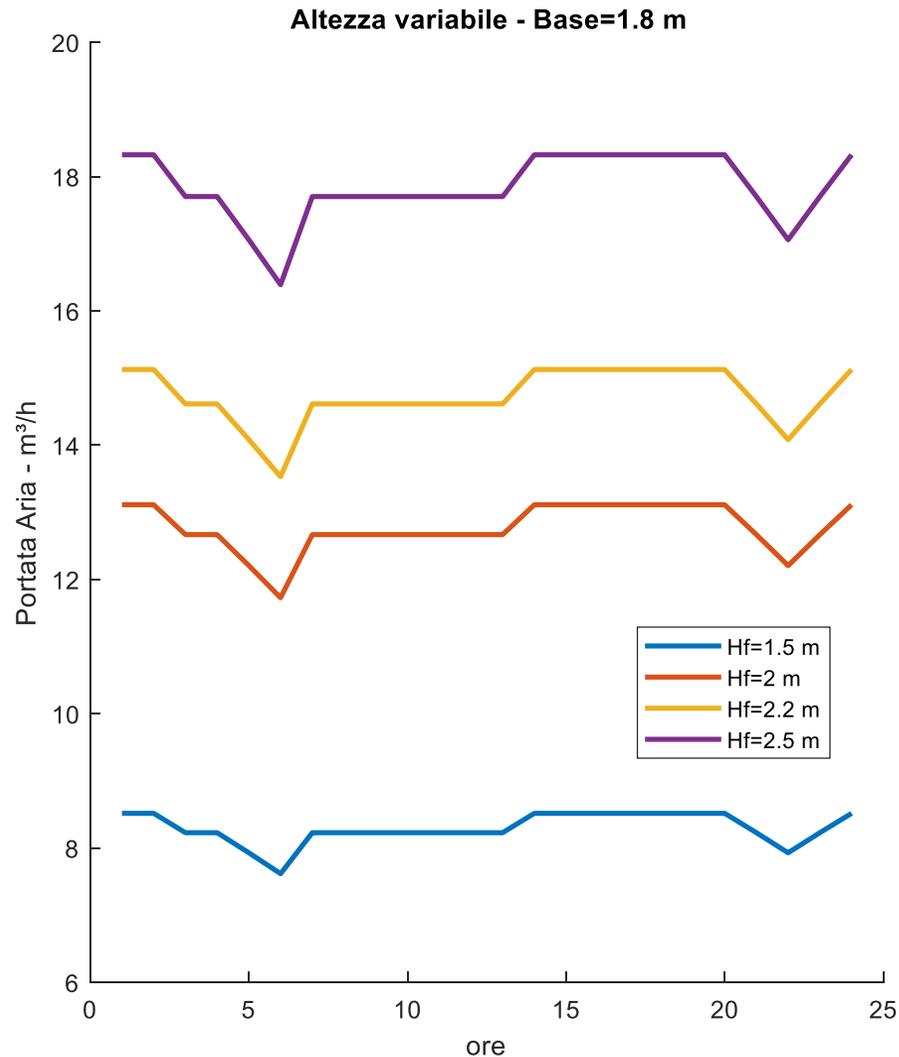
ove si ha:

- Q portata d'aria di infiltrazione naturale, (m³/h);
- A_F Area della finestra, (m²);
- v_E volume specifico dell'aria esterna, (m³/kg);
- H_F altezza della finestra, (m);
- T_e temperatura dell'aria esterna, (°C);
- T_i temperatura dell'aria interna, (°C);
- 1.204 densità di riferimento dell'aria, (kg/m³).

La mancanza della velocità del vento rende più agevole l'utilizzo della relazione semplificata ma più soggetta a errore nel caso di giornate ventose.

Ventilazione naturale – Solo differenza di Temperatura

Si riporta un esempio di calcolo della portata di ventilazione naturale calcolata con le sole differenze di temperatura.



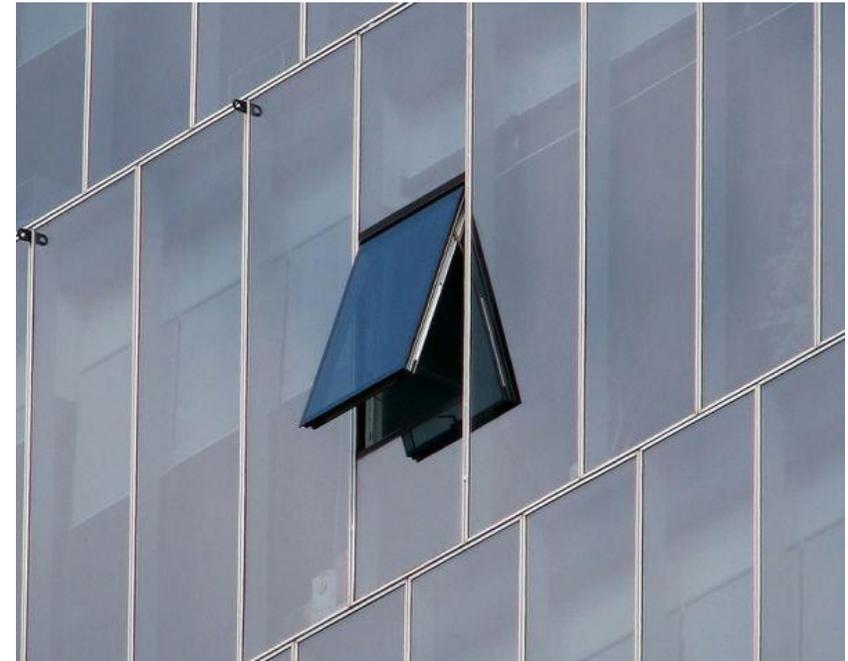
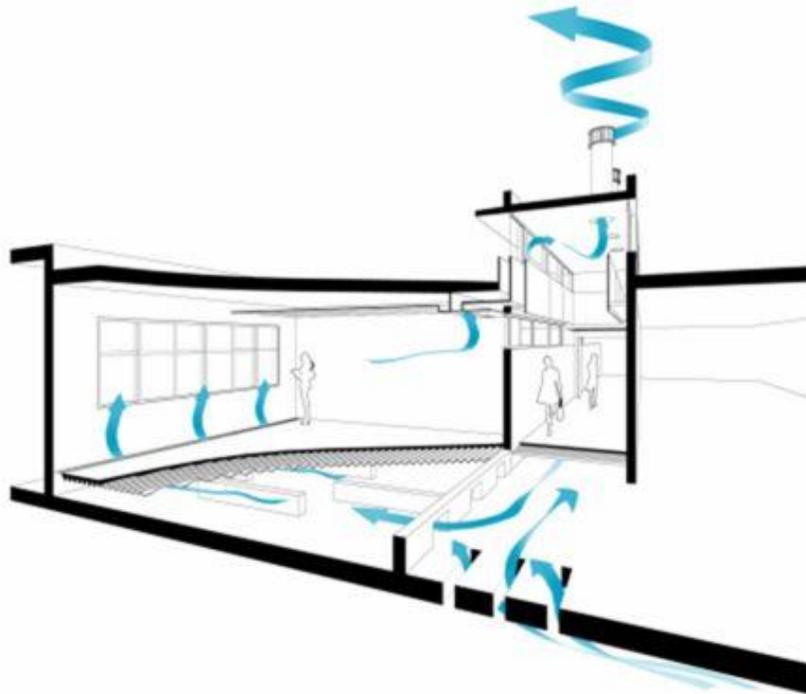
Ventilazione naturale – UNI EN 15242

La stessa norma permette di calcolare la portata d'aria attraverso una finestra aperta parzialmente (*Vasistas*) mediante la relazione:

$$Q_{FA_p} = \left(2.6 \cdot 10^{-7} \alpha^3 - 1.19 \cdot 10^{-7} \alpha^2 - 1.86 \cdot 10^{-7} \alpha \right) A_{FA}$$

ove α è l'angolo di apertura della finestra.

In entrambi i casi la distribuzione dell'aria all'interno degli ambienti non è mai uniforme poiché dipende dai gradienti di pressione (quindi anche dei venti) e temperatura presenti in ogni istante.



Ventilazione naturale

In genere si utilizzano **relazioni semplificate** che mettono in relazione la **portata di ventilazione con la differenza di pressione fra interno ed esterno**.

Per moto laminare si ha (in m^3/h):

$$Q \propto \Delta p$$

Per moto turbolento:

$$Q \propto \sqrt{\Delta p}$$

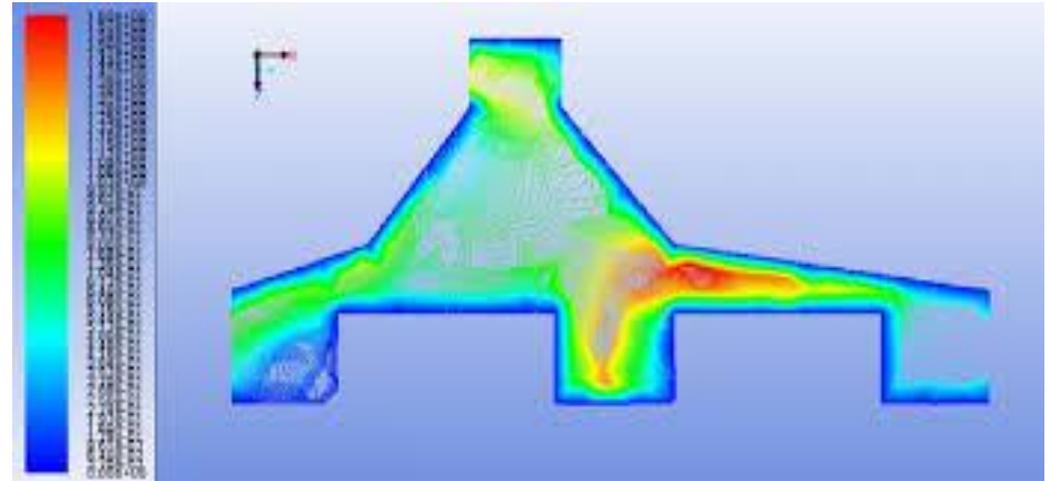
Per regimi misti si ha:

$$Q \propto \Delta p^m$$

con m variabile fra **1** (*laminare*) e **0.5** (*turbolento*)

Una finestra aperta di **2 m^2** lascia entrare, mediamente, circa **2000 m^3/h** in inverno. Per un ricambio dell'aria completo basta aprire la finestra per qualche minuto.

Si osservi che tenere aperte le finestre significa annullare gli effetti del microclima interno. Per questo motivo, ad esempio, le **norme francesi** impongono di utilizzare dei sensori posti sugli infissi che comandano lo spegnimento del terminale dell'ambiente nel quale si aprono le finestre.



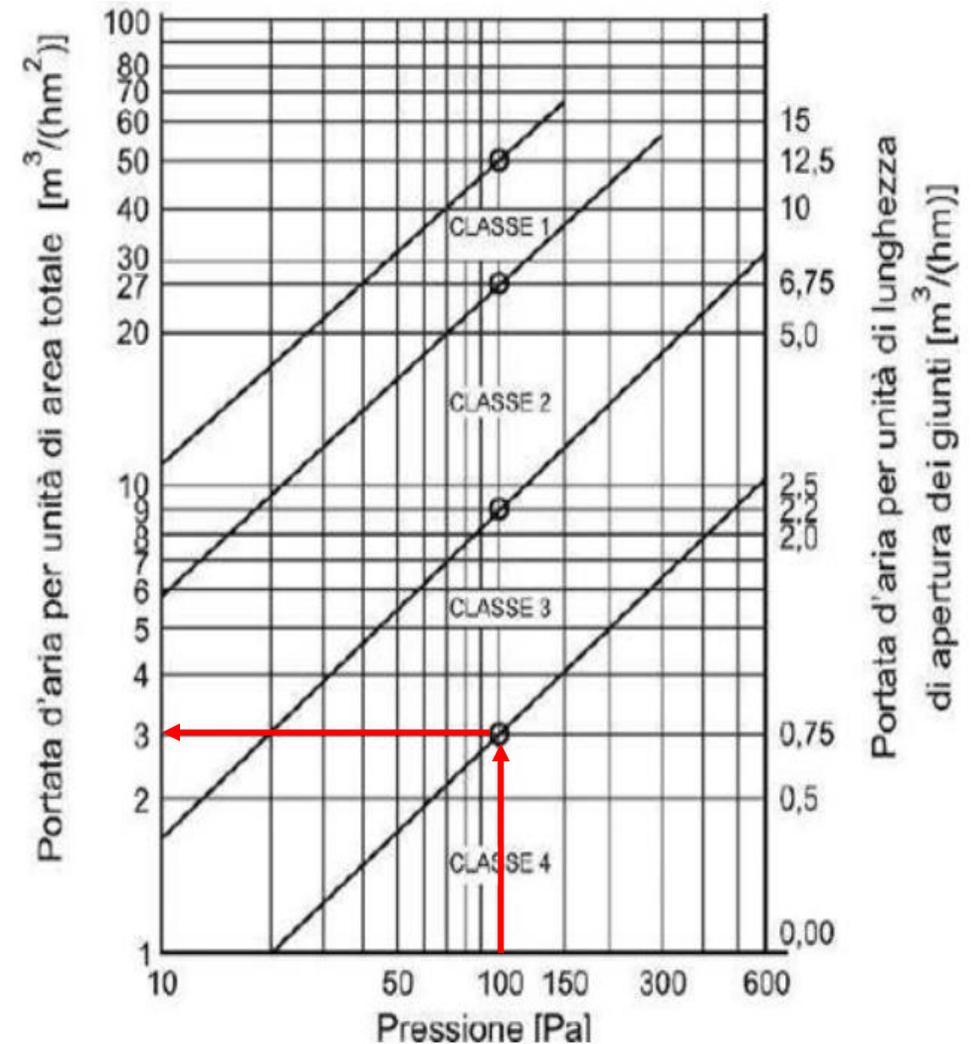
Ventilazione naturale – Controllo mediante valvole nelle finestre

I **moderni serramenti a tenuta** hanno le seguenti caratteristiche:

- Hanno un buon isolamento termico;
- Hanno un buon potere fonoisolante;
- Hanno **ridotte capacità di ventilazione**.

In definitiva gli attuali infissi a tenuta non garantiscono una ventilazione naturale sufficiente.

Per questo motivo si consigliano opportune **valvole** a differenza di pressione da applicare alle finestre per garantire un corretto ricambio d'aria.



Ventilazione naturale - Difficoltà di integrazione architettonica

Alcune **difficoltà di integrazione architettonica** si possono riscontrare sia in corrispondenza dell'involucro edilizio sia in corrispondenza degli spazi interni abitabili. Le strategie di ventilazione naturale sopra illustrate non comportano solitamente l'utilizzo di dispositivi tecnologici di rilevante impatto visivo.

Tuttavia, i sistemi di smaltimento dei flussi d'aria calda in uscita (per *effetto camino*), piuttosto che quelli di captazione e regolazione delle correnti d'aria in entrata e della radiazione solare, possono richiedere l'impiego di **serramenti esterni** non convenzionali (*incluse le chiusure oscuranti*).

Nel caso di realizzazioni ex novo in aree urbane di particolare pregio storico-architettonico e paesaggistico, tali sistemi tecnologici possono quindi presentare caratteristiche formali e tipologiche difficilmente integrabili nel contesto.

Ulteriori difficoltà di **integrazione architettonica** si possono manifestare sul piano della distribuzione e gestione degli spazi interni abitabili.

Infatti, **le strategie di ventilazione naturale richiedono necessariamente che il flusso d'aria sia “*passante*” attraverso gli ambienti confinati**. Questo aspetto **potrebbe condizionare perciò l'organizzazione interna dell'edificio**, nella misura in cui **limita le partizioni perpendicolari al flusso d'aria prevalente** e colloca gli arredi in modo da non ridurre eccessivamente la velocità.

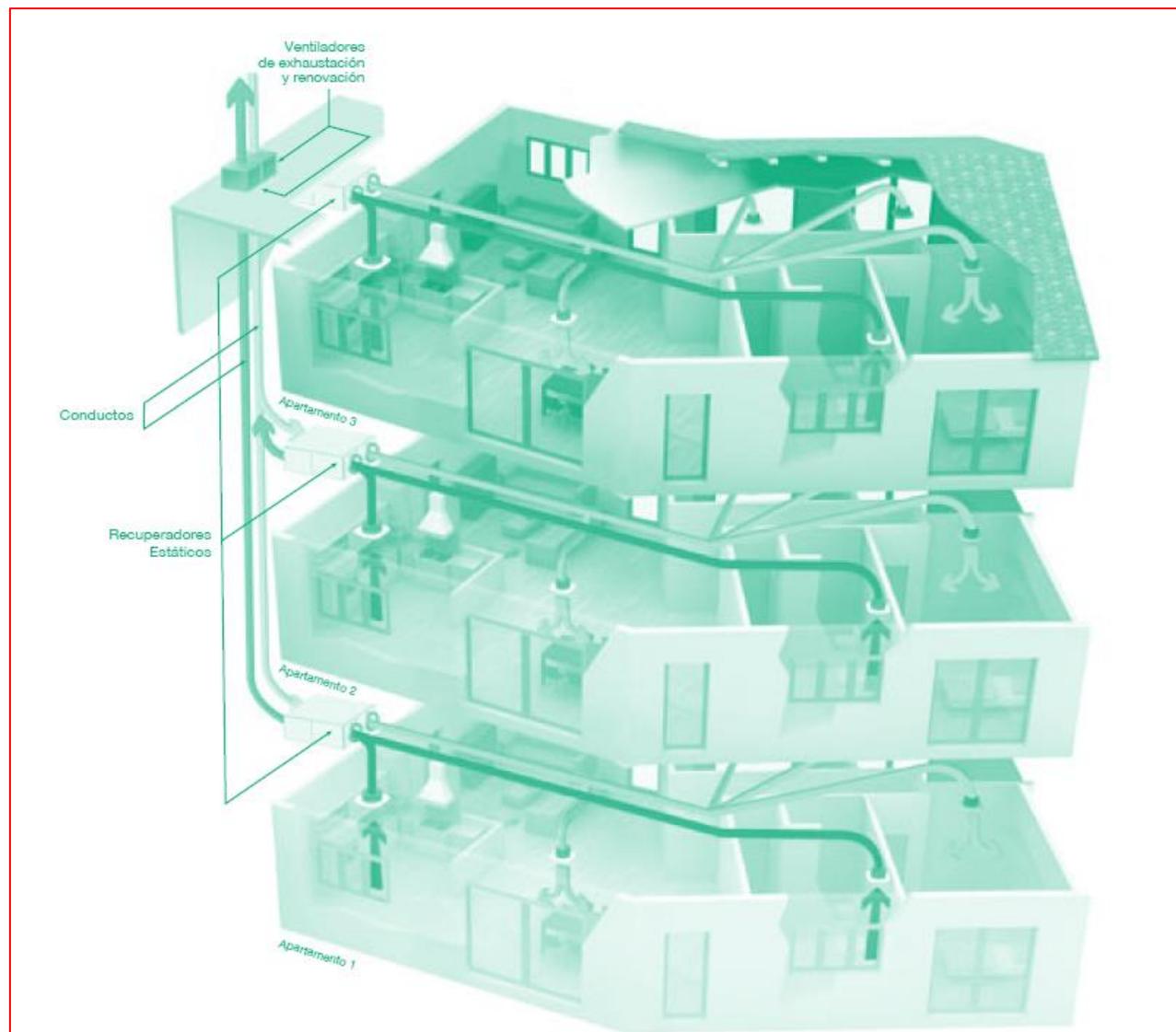
Il passaggio attraverso gli ambienti interni può favorire la diffusione dei droplet e quindi aumentare le probabilità di contagio. L'ISS sconsiglia la ventilazione passante fra ambienti.

Parere del Presidente AICARR per la Ventilazione Naturale Nelle Scuole

Il tema della **riapertura delle scuole a settembre**, quando si prevede ancora la possibilità di focolai di coronavirus, solleva un dibattito pressoché quotidiano che coinvolge politica, comunità scientifica e dirigenti scolastici, alle prese con classi numerose, spazi non adeguati e strutture spesso obsolete. **Fra le misure da adottare per una riapertura in sicurezza rientra senza dubbio la corretta ventilazione degli ambienti scolastici.**

A questo proposito, il *Presidente di AiCARR, Filippo Busato*, ha sottolineato in una nota inviata alle agenzie di stampa: «*In vista della eventuale riapertura delle scuole a settembre è prioritario pensare a soluzioni adeguate per il comfort e per la salute degli alunni. L'esperienza e le evidenze recenti, dovute alla pandemia da Covid-19, mettono in luce che l'apporto di aria esterna con la ventilazione non solo migliora la qualità dell'ambiente interno, ma può migliorare le condizioni igieniche e portare benefici alla salute, riducendo con la diluizione e la filtrazione la quantità di contaminanti presente in ambiente*». "La ventilazione è tanto più necessaria quanto più affollati sono gli ambienti. **Gli unici locali ad elevato affollamento privi, nella maggior parte, di impianti di ventilazione sono proprio quelli delle scuole esistenti.** Spesso le condizioni climatiche rendono sconveniente l'apertura e chiusura delle finestre, compatibilmente col mantenimento delle condizioni di comfort. **Per questo motivo, è quanto mai indispensabile provvedere alla modernizzazione delle scuole italiane che non sono provviste di impianti di ventilazione meccanica adatti al miglioramento della qualità dell'aria**».

LA VENTILAZIONE FORZATA



Ipotesi di calcolo della ventilazione meccanica

La **ventilazione meccanica** è sempre stata studiata come strumento di controllo per la diluizione di sostanze inquinanti ai fini del **controllo della qualità dell'aria, IAQ**.

Le sostanze inquinanti sono solitamente di tipo gassoso (*VOC, o altri gas*) che si mescolano intimamente all'aria ottenendo un sistema fisicamente omogeneo.

Con l'aria di ventilazione otteniamo la **diluizione omogenea** degli inquinanti e pertanto non dobbiamo fare alcuna differenziazione fra componenti chimici.

Al fine del controllo della diffusione del contagio da **COVID 19** i componenti non sono tutti gassosi ma abbiamo una miscela fra:

- **Aria di ventilazione**, o anche aria interna stagnante se la ventilazione manca;
- **Gocciolone di liquido organico, droplet e nuclei di droplet (aerosol)** che contengono le cariche virali capaci di infettare i soggetti presenti negli ambienti.

Tuttavia, per quanto illustrato nella pagine precedenti, le ridottissime dimensioni dei **droplet** e dei **nuclei** (di alcuni μm) e la loro massa altrettanto ridotta di qualche *ng* rendono le goccioline completamente legate ai flussi di corrente d'aria. Pertanto, considereremo ancora una volta valido il **modello omogeneo** e che la **ventilazione meccanica sia completamente miscelata**.

In realtà, si vedrà come i tipi di ventilazione reali adottate non rispettino completamente quest'ipotesi di completa miscelazione. Non potremo fare altro tipo di calcolo anche perché la separazione fisica fra l'aria e le particelle renderebbe i modelli di calcolo molto complessi.

Elementi di teoria della Ventilazione

Consideriamo una stanza completamente chiusa nella quale la concentrazione di inquinanti è la stessa in ogni suo punto interno. Data una fonte inquinante, q , l'equazione per la **concentrazione** può essere scritta come:

$$V \frac{dc}{dt} = q(c_0 - c) + \dot{V}_{pol}$$

dove:

- V = volume di spazio (m^3)
- c = concentrazione (% o L/m^3 o kg/m^3)
- q = portata di ventilazione (m^3/s), $n \cdot V$;
- c_0 = concentrazione dell'aria di mandata (% o L/m^3 o kg / m^3)
- dc = variazione di concentrazione (% o L/m^3 o kg / m^3)
- dt = intervallo di tempo, (h)
- \dot{V}_{pol} = tasso di generazione di inquinanti nella stanza (m^3/h o L/h o kg/h).

L'integrale generale dell'equazione della ventilazione è:

$$c = (c_0 + c_G)(1 - e^{-nt}) + c_I e^{-nt} = c_0 + c_G + (c_I - c_0 - c_G)e^{-nt}$$

con

c_G concentrazione della sorgente

c_I concentrazione iniziale al tempo $t = 0$

n numero di ricambi d'aria

Elementi di teoria della Ventilazione

La soluzione dell'equazione differenziale è:

$$c = (c_0 + c_G)(1 - e^{-nt}) + c_I e^{-nt}$$

Essa presenta due parti:

$$c = c_0 + \frac{\dot{V}_{pol}}{q}$$

1. la prima rappresenta la soluzione in regime stazionario:
2. la seconda rappresenta la soluzione transitoria della concentrazione nel tempo.

Al fine del controllo della concentrazione di inquinante occorre controllare il **numero di ricambi orari, n**.

In condizioni stazionarie, per quanto sopra detto, si ha:

$$\text{Concentrazione interna} = \text{Concentrazione esterna} + \frac{\text{Intensità Volumetrica della sorgente interna}}{\text{Flusso di ventilazione}}$$

Pertanto:

- **Maggiore è la concentrazione esterna tanto maggiore è la concentrazione interna:**
- **Maggiore è il flusso di ventilazione tanto minore è la concentrazione interna;**
- **Maggiore è l'intensità della sorgente interna tanto maggiore è la concentrazione interna.**

Si osservi come la soluzione a regime stazionario sopra descritta non tenga conto di vari processi di eliminazione, quali la deposizione su superfici dell'inquinante, la trasformazione per collisione con altre particelle, processi chimici di decadimento o perdita di sensibilità degli organismi. Questi effetti saranno esaminati separatamente.

Elementi di teoria della Ventilazione

Ad esempio. con i seguenti dati:

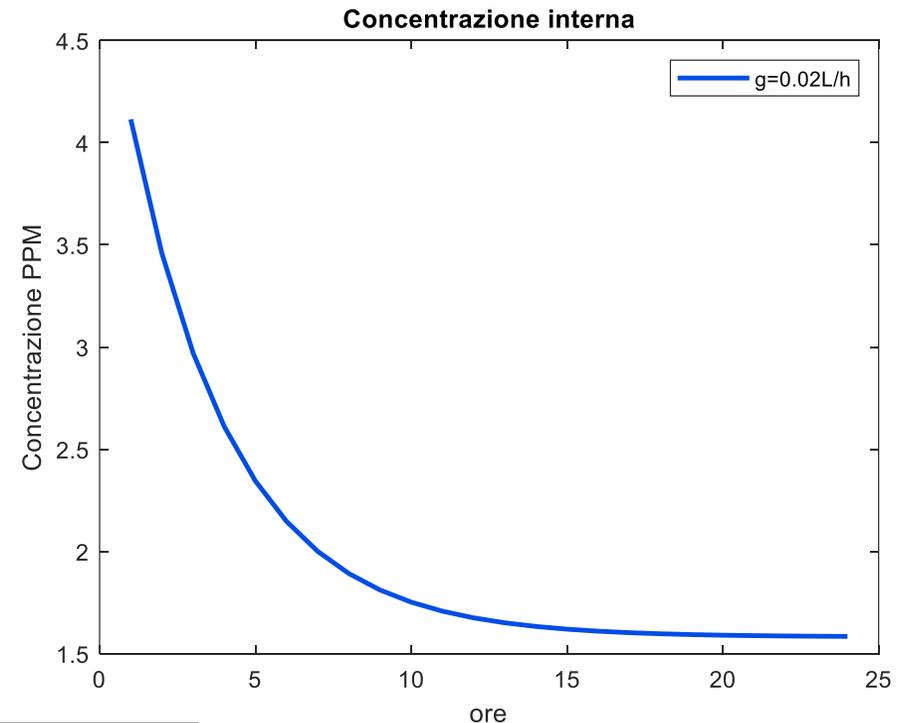
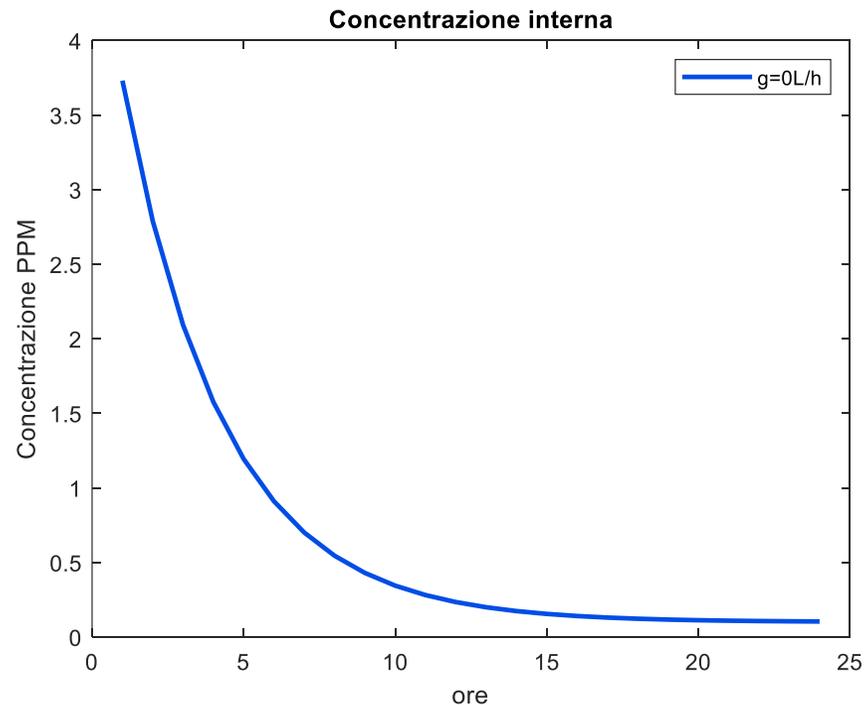
```
c0=5;           % concentrazione iniziale ambiente, ppm
cout=0.1;      % concentrazione dell'aria esterna, ppm
gint=0.0;      % tasso di produzione ambiente, L/h
n=0.3;         % numero di ricambi orari
V=3*5*3;      % Volume ambiente, mc
Q=V*n;        % portata volumetrica di ventilazione, mc/h
```

```
t=1:24;
```

```
c0=5;           % concentrazione iniziale ambiente, ppm
cout=0.1;      % concentrazione dell'aria esterna, ppm
gint=0.02;     % tasso di produzione ambiente, L/h
n=0.3;         % numero di ricambi orari
V=3*5*3;      % Volume ambiente, mc
Q=V*n;        % portata volumetrica di ventilazione, mc/h
```

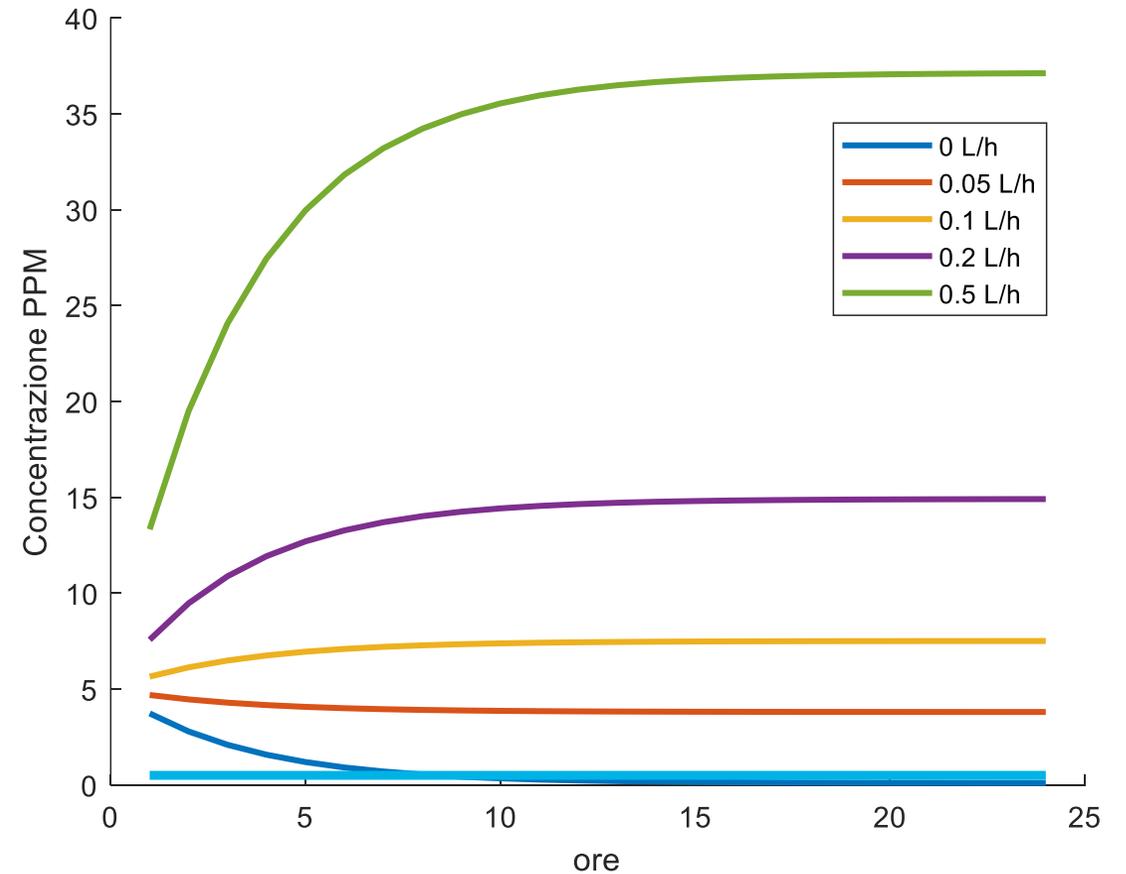
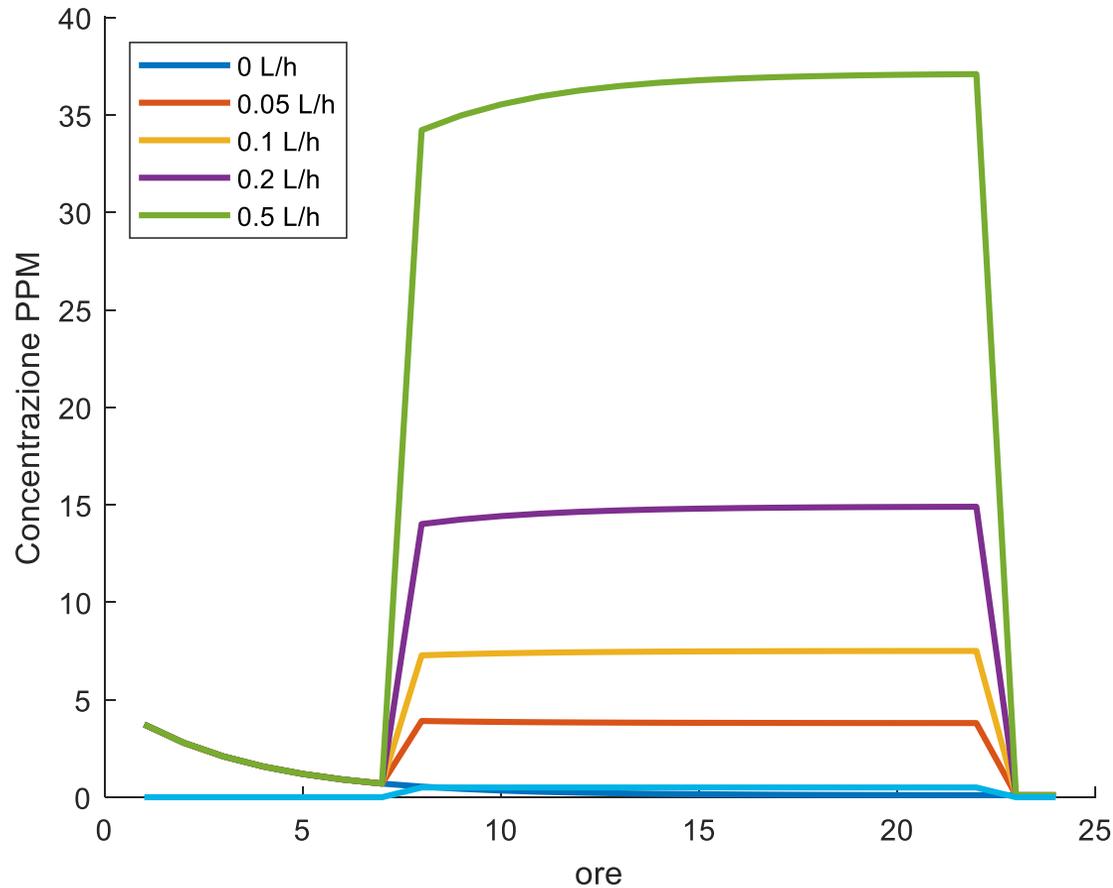
```
t=1:24;
```

Si ottiene:



Elementi di teoria della Ventilazione

Si possono studiare **transitori** nei quali anche la **sorgente varia nel tempo**. Ad esempio, supponendo che questa sia attiva dalle 8 alle 23 si ha il seguente abaco a sinistra mentre a destra la sorgente è sempre attiva.



Elementi di teoria della Ventilazione

Si osservi che nelle relazioni precedenti abbiamo considerato un generico inquinante (CO_2 , *argon*, *VOC*, ...) ed abbiamo trovato risultati validi sia per il regime stazionario che transitorio.

Se considerassimo (e lo faremo nel prosieguo) la concentrazione spaziale dei **quanta** (*quanta/m³*) potremmo studiare perfettamente l'evoluzione oraria della concentrazione (**quantità/m³**) di qualsivoglia patogeno.

In questo modo, tuttavia, otterremmo solamente informazioni fisiche sulla distribuzione della concentrazione spaziale dei patogeni ma non avremmo alcuna informazione che le leghi al rischio di contagio.

Nel caso del controllo della **Qualità dell'Aria (IAQ)** dalle concentrazioni possiamo risalire agli effetti mediante le tabelle sulle concentrazioni limiti indicate dalle norme vigenti.

Nei prossimi capitoli si presenteranno alcune fra le relazioni di calcolo più utilizzate nelle applicazioni per calcolare il **rischio di contagio personale** per il virus **SARS-CoV-2** (come per qualunque altro patogeno con trasmissione aerea).

In questo modo potremmo trasformare un'informazione di tipo biologico (i **quanta**) in una **probabilità di contagio** che tenga conto anche delle **caratteristiche tecnologiche dell'impianto di ventilazione** (ventilazione meccanica) o della ventilazione naturale.

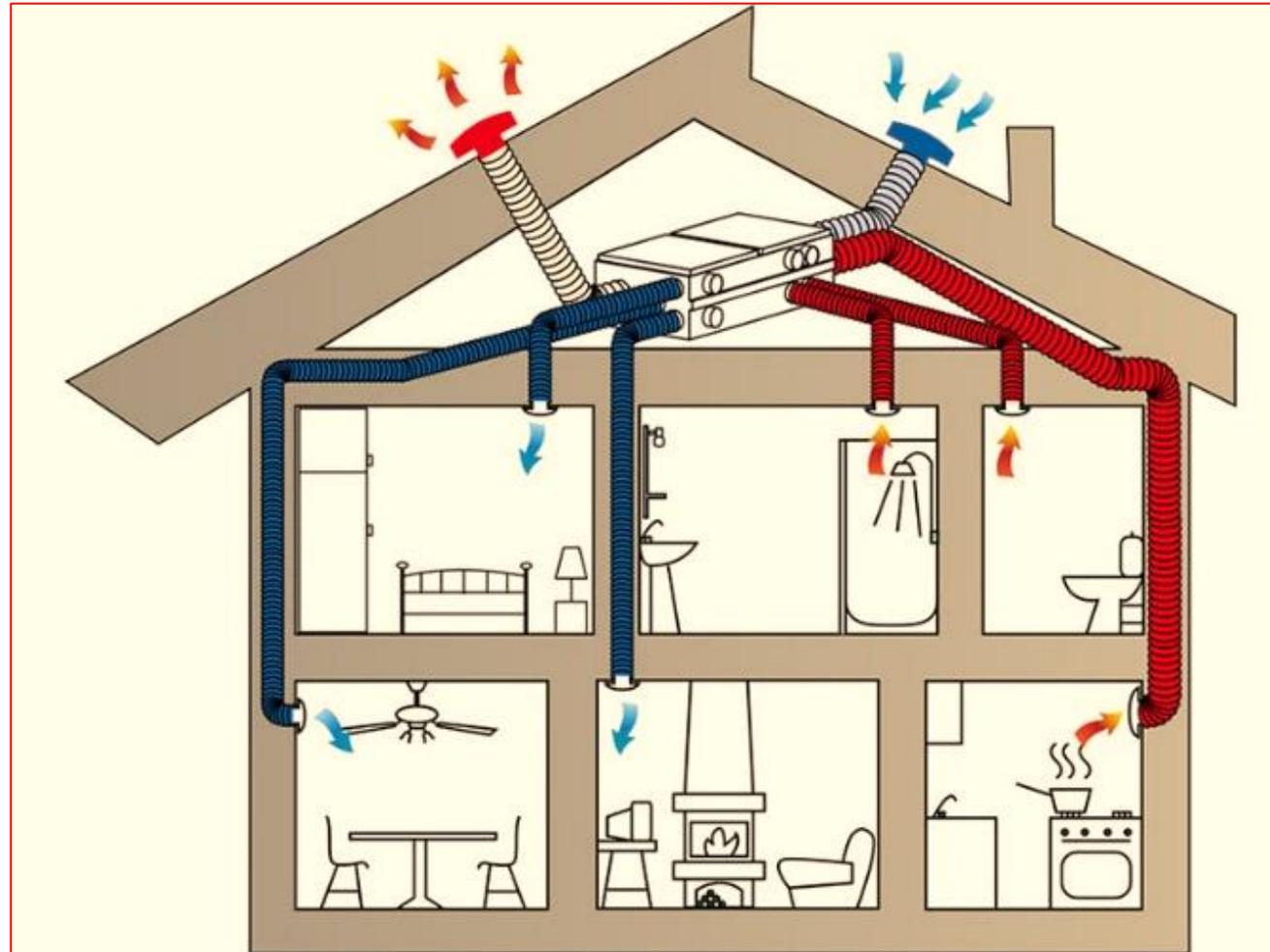
Sono proprio i **quanta** a consentire questo passaggio perché, come già osservato, essi **contengono informazioni sia sulle quantità di patogeni che sulla loro possibilità di contagio** (studio epidemiologico).

Numero di ricambi d'aria e tempo richiesto per eliminare l'aerosol

L'ISS ha pubblicato nel **Rapporto n. 33/2020** del **25/05/2020** la seguente tabella sui tempi di rimozione delle particelle al variare del **numero di ricambi orari** (Vol/h).

Numero di ricambi d'aria/ora (vol/h)*	Tempo richiesto per una rimozione efficiente pari al 99% delle particelle (in minuti)	Tempo richiesto per una rimozione efficiente pari al 99,9% delle particelle (in minuti)
2	138	207
4	69	104
6	46	69
8	35	52
10	28	41
12	23	35
15	18	28
20	14	21
50	6	8

DISTRIBUZIONE DELL'ARIA NEGLI AMBIENTI



La distribuzione dell'aria

I **droplet** si spostano con facilità sotto l'azione di qualunque **gradiente di pressione** e/o di **temperatura** di verificarsi in un ambiente. Anche in un ambiente chiuso non ventilato i **droplet** si spostano:

- *per convezione termica innescata dalla presenza delle persone o di oggetti caldi,*
- *per il movimento delle braccia, per lo spostamento delle persone all'interno dell'ambiente,*
- *per l'apertura o la chiusura di una porta o di una finestra,*
- *per il semplice respiro o il parlare delle persone, ...*

Il virus da solo riveste poco interesse perché non riesce ad infettare le persone. I **droplet** contenenti **migliaia di virus** costituiscono la **carica virale** necessaria per trasmettere il contagio.

Si è più volte detto che la **ventilazione** degli ambienti chiusi è storicamente considerato come uno dei metodi più efficaci di **riduzione del rischio da contagio**.

La **ventilazione naturale** è efficace se è in grado di raggiungere tutti gli ambienti e garantire un ricambio d'aria opportuno (oltre i *3 Vol/h consigliati*). Inoltre, specialmente nel periodo invernale, non è possibile aprire finestre e porte per ventilare gli ambienti e quindi si ha il rischio concreto di rendere la **ventilazione naturale** quasi nulla.

La **ventilazione meccanica** supera queste difficoltà perché controllata dal sistema di ventilazione (*ventola, canali, bocchette, ...*) e certamente risulta **più efficiente**. Ne vedremo subito le caratteristiche.

Tipologia di distribuzione dell'aria – Ventilazione meccanica

I metodi più comuni di **distribuzione dell'aria** negli ambienti con **ventilazione meccanica** sono i seguenti:

- *Ventilazione miscelata (**mixed ventilation**), MV;*
- *Ventilazione a dislocamento (**Displacement ventilation**), DV;*
- *Ventilazione da sotto il pavimento (**Under Floor Air Distribution**), UFAD;*
- *Ventilazione verso il basso (**Downward Ventilation**), DnV;*

Si hanno due tipi di ventilazione personalizzate:

- *Ventilazione personalizzata (**Personalized Ventilation**), PV;*
- *Ventilazione di estrazione personalizzata (**Personalized Exhaust**), PE.*

Possono anche essere presenti più tipologie di ventilazione fra quelle generali e quelle personalizzate.

Si vedranno nelle prossime pagine alcuni casi esempio dei sistemi di ventilazione applicati ad a **una stanza**, ad un **teatro**, e ad una **sala operatoria**.

Si è utilizzata la **Computer Fluid Dynamics (CFD)** accoppiata alle **equazioni dell'energia** e della **diffusione termica**. I casi esaminati sono denominati **sistemi complessi** perché somma di diversi tipologie di fenomeni.

I programmi di soluzione delle equazioni **CFD**, dell'energia e della diffusione sono di tipo **multifisico** e richiedono elevate risorse di calcolo e tempi di elaborazione considerevoli.

La distribuzione dell'aria

La **distribuzione dell'aria** deve soddisfare, oltre ai requisiti di portata di ventilazione necessaria per la **IAQ** ottimale, anche il criterio di *omogeneità* che deve risultare massima all'interno dei locali.

La norma **UNI 10339:1995** prescrive che la **distribuzione dell'aria debba garantire che il flusso d'aria immesso si misceli con l'aria ambiente in tutto il volume convenzionale occupato, con velocità dell'aria all'interno del locale entro determinati limiti, e comunque non superiore a 0,3 m/s in corrispondenza della superficie luogo dei punti distanti 60 cm dal perimetro della griglia.**

Le **regole euristiche** per la distribuzione dell'aria sono quasi sempre orientate a indicare criteri generali per favorire la circolazione dell'aria nell'ambiente in modo che questa abbia una velocità massima di **0.2 m/s** in corrispondenza della testa delle persone (*zona centrale dell'ambiente*).

E' noto, infatti (vedi *Teoria di O. Fanger*), che una **velocità superiore a questo limite** porta ad avere una **reazione negativa** da parte degli occupanti (specialmente dalle persone più anziane) e spesso si ha lo spegnimento del sistema di ventilazione.

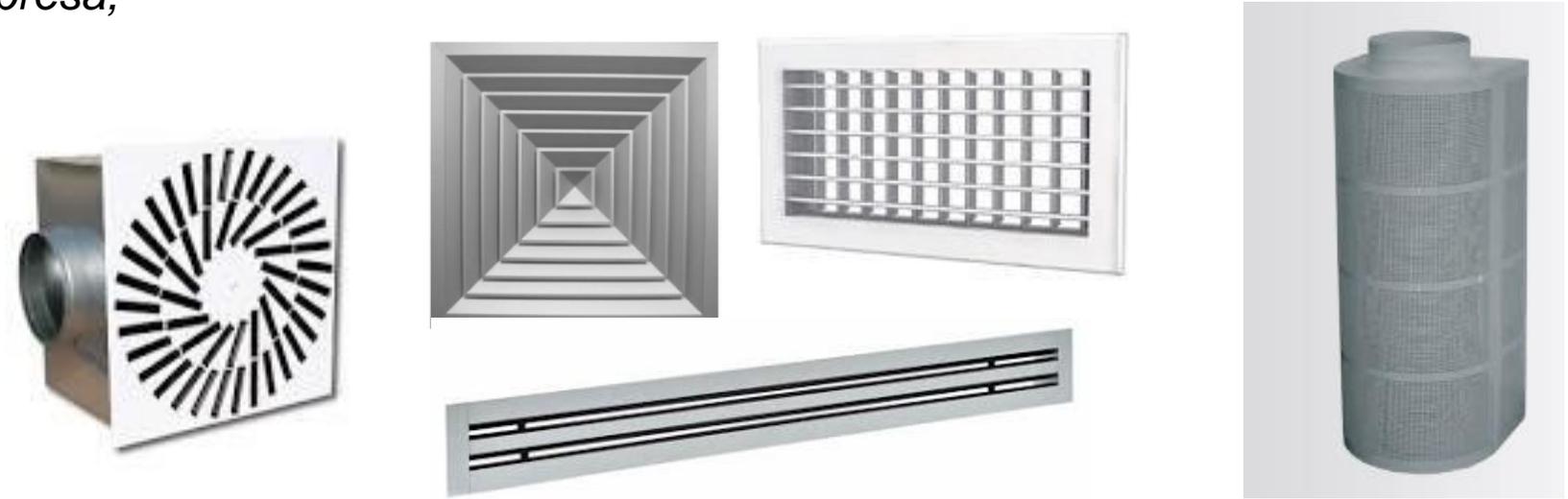
In alcuni casi si preferisce un sistema a circolazione naturale (ad esempio un impianto con termosifoni o piastre radianti) piuttosto che una distribuzione d'aria con bocchette o fan coil.

Viceversa, alcune persone (per effetto dell'assuefazione agli impianti) spesso desiderano una forte ventilazione sul proprio corpo per sentire maggiormente l'azione del riscaldamento o del raffrescamento.

La distribuzione dell'aria – I terminali di distribuzione

La distribuzione dell'aria con sistemi di **ventilazione meccanica** è attuata principalmente mediante:

- *Bocchette e griglie di mandata e ripresa;*
- *Diffusori normali elicoidali;*
- *Diffusori lineari;*
- *Diffusori a getto elicoidali;*
- *Diffusori a dislocamento.*

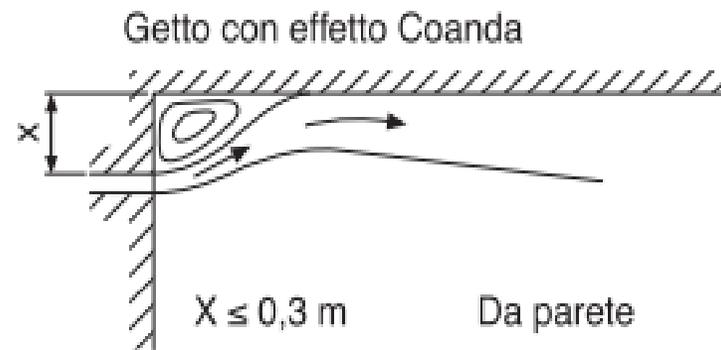
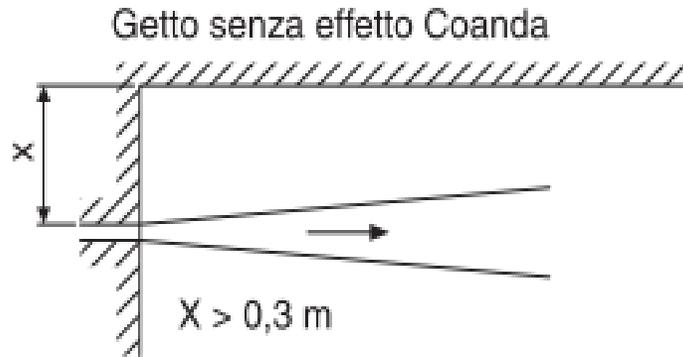


Negli impianti misti **aria primaria** e **fan coil** quest'ultimi distribuiscono aria attraverso la griglia di mandata, solitamente orientabile.

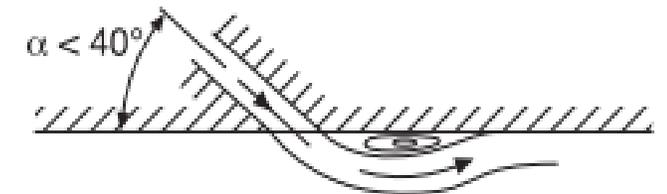


La distribuzione dell'aria – Fenomeni principali

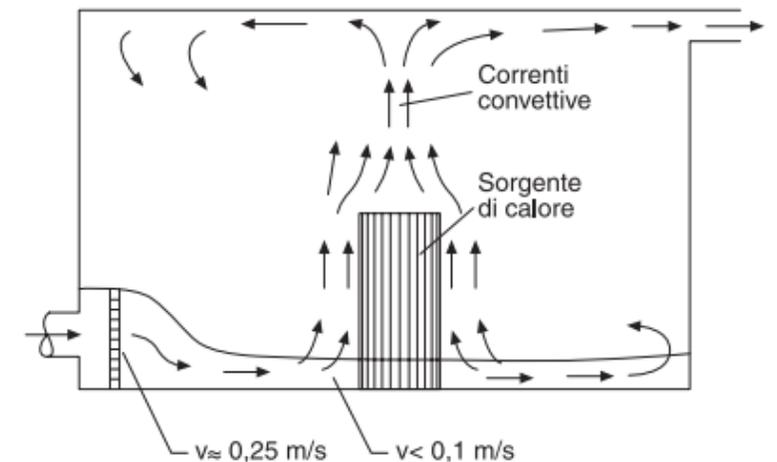
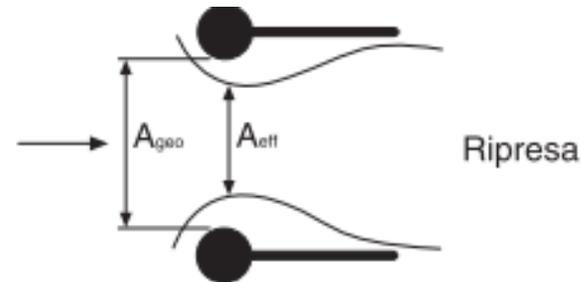
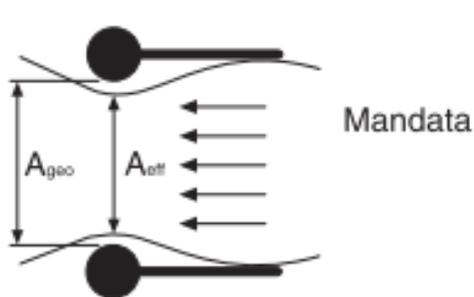
In tutti i casi si hanno sistemi di **distribuzione forzata** di tipo **puntuale** (rispetto alle dimensioni dell'ambiente) nei quali prevale **una direzione preferenziale** di distribuzione dell'aria data dall'orientamento delle **alette delle bocchette** o dei **coni dei diffusori** e delle **griglie di mandata dei fan coil**. Le **bocchette** sono caratterizzate dal **lancio** e della **velocità di uscita**, dalla presenza di pareti nelle vicinanze (**effetto Coanda**) e dagli effetti di **pennacchio** dei sistemi a dislocamento.



Da parete



Da soffitto



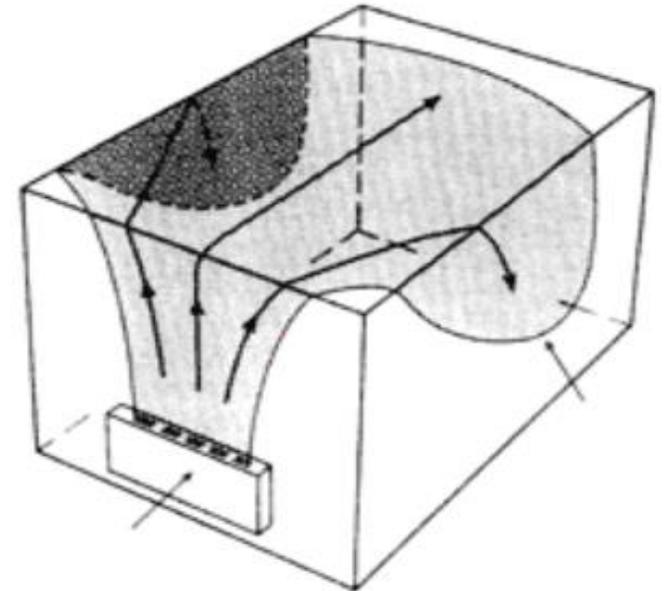
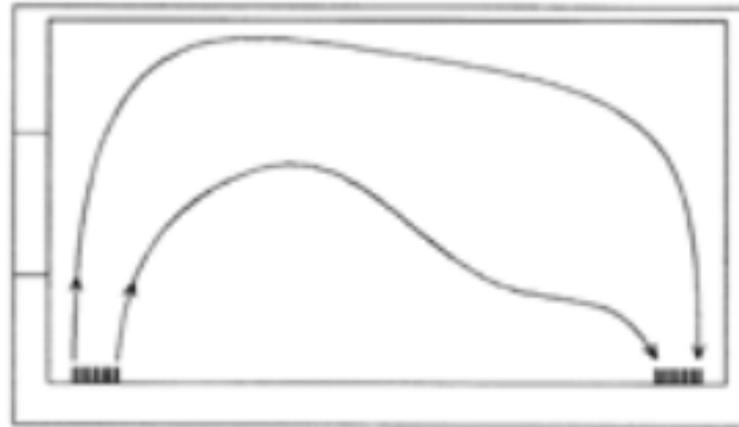
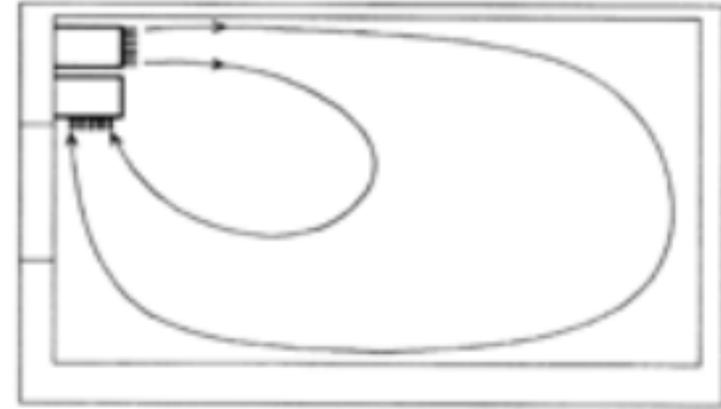
Distribuzione dell'aria – Percorsi preferenziali

I movimenti d'aria in un locale dipendono anche **dalla temperatura** più elevata dell'aria immessa e del **raffreddamento** dell'aria lungo le pareti.

La **posizione relativa delle bocche di mandata e quella di aspirazione** possono essere molto diverse ed è importante collocarle in modo adeguato per ottenere una buona diffusione dell'aria.

Le figure indicano quattro delle più frequenti per locali con dimensioni discrete.

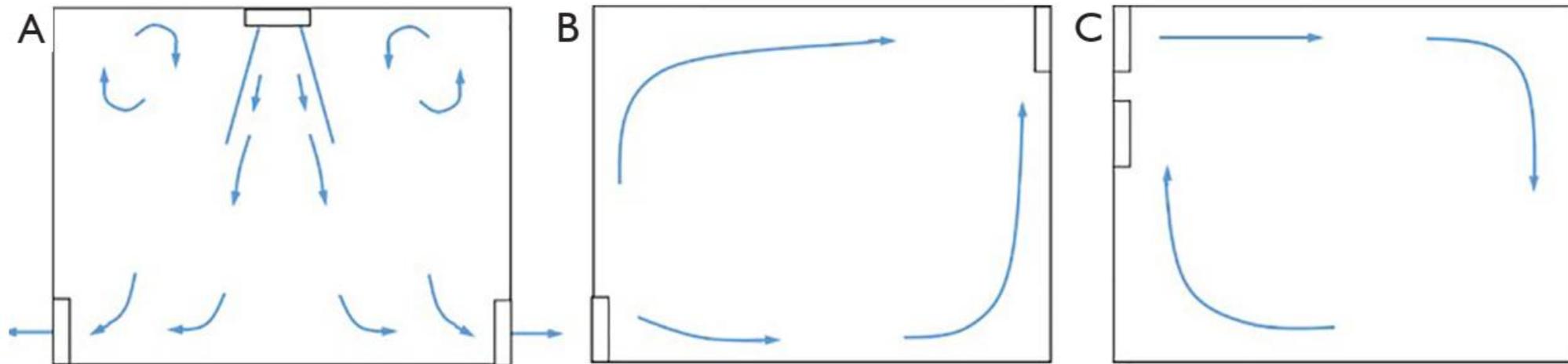
Se i locali raggiungono **dimensioni considerevoli** o hanno forme irregolari, bisogna **suddividere in zone** la diffusione ricorrendo alla distribuzione di più dispositivi di mandata e di ripresa.



La distribuzione dell'aria – I problemi impiantistici

Raramente, in fase di realizzazione degli impianti, si effettua uno studio sulla qualità della distribuzione dell'aria negli ambienti, sia perché esso richiede strumenti di calcolo sofisticati e costosi, sia perché non se ne ha un ritorno economico per l'installatore e per il progettista. Le **regole euristiche** portano a posizionare le bocchette, le griglie, i diffusori e i fan coil nel modo ritenuto migliore o, purtroppo, a secondo delle possibilità offerte dall'architettura degli ambienti.

I **vincoli architettonici** portano sovente a posizionare i terminali in modo da essere **meno invasivi visivamente**, trascurandone l'efficacia nella distribuzione e quindi anche il benessere all'interno degli ambienti. Infine, la possibilità di cambiare l'inclinazione delle alette delle griglie di mandate o di aprire e chiudere le alette di regolazione porta sia a cambiare la distribuzione dell'aria (ammesso che sia stata inizialmente ottimizzata e bilanciata) che a cambiare le portate d'aria immessa e quindi a squilibrare la rete di distribuzione dei canali. Se si desidera studiare correttamente il problema della **distribuzione dell'aria** si debbono seguire le regole e i mezzi di calcolo che si illustreranno nelle pagine seguenti.



EFFETTI DISTRIBUZIONE DELL'ARIA SULLA DIFFUSIONE DEI DROPLET NEGLI AMBIENTI

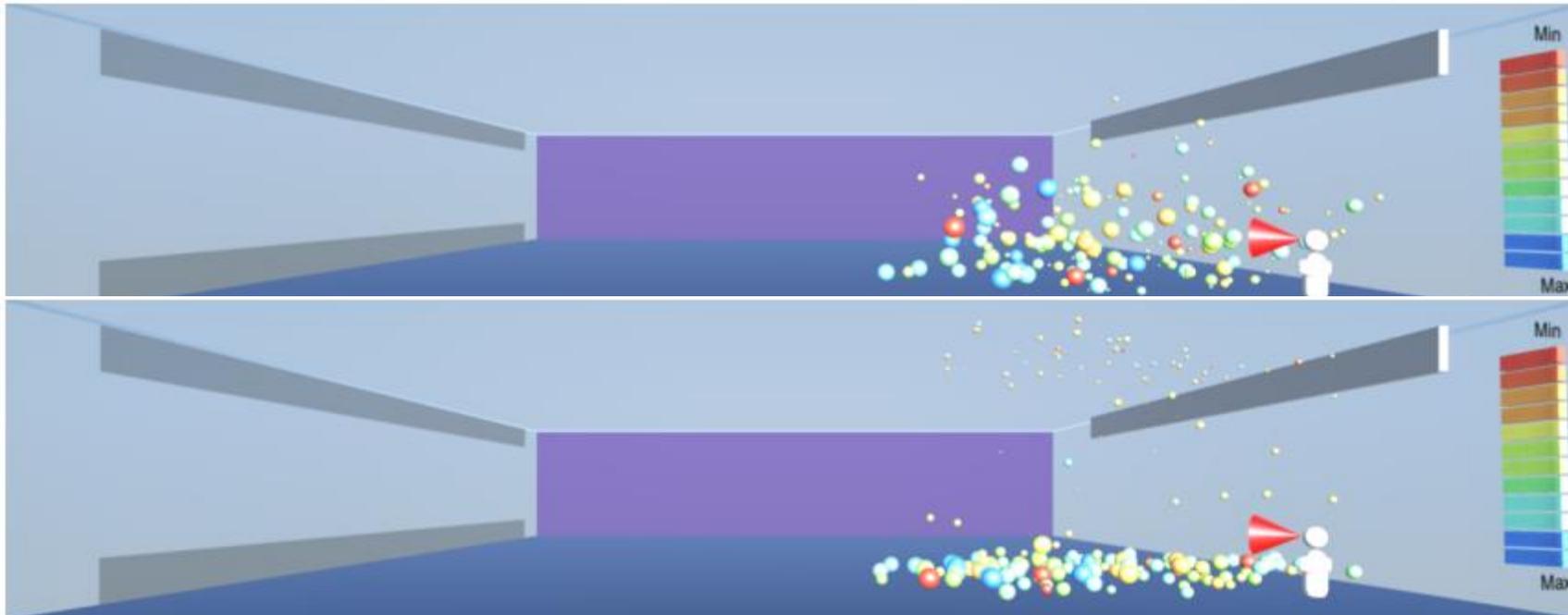


Effetti della distribuzione dell'aria sulla diffusione dei droplet

Nelle figure seguenti si ha una simulazione (tramite CFD) della diffusione dei droplet. Nel primo caso si ha la diffusione dovuta ad uno **starnuto**.

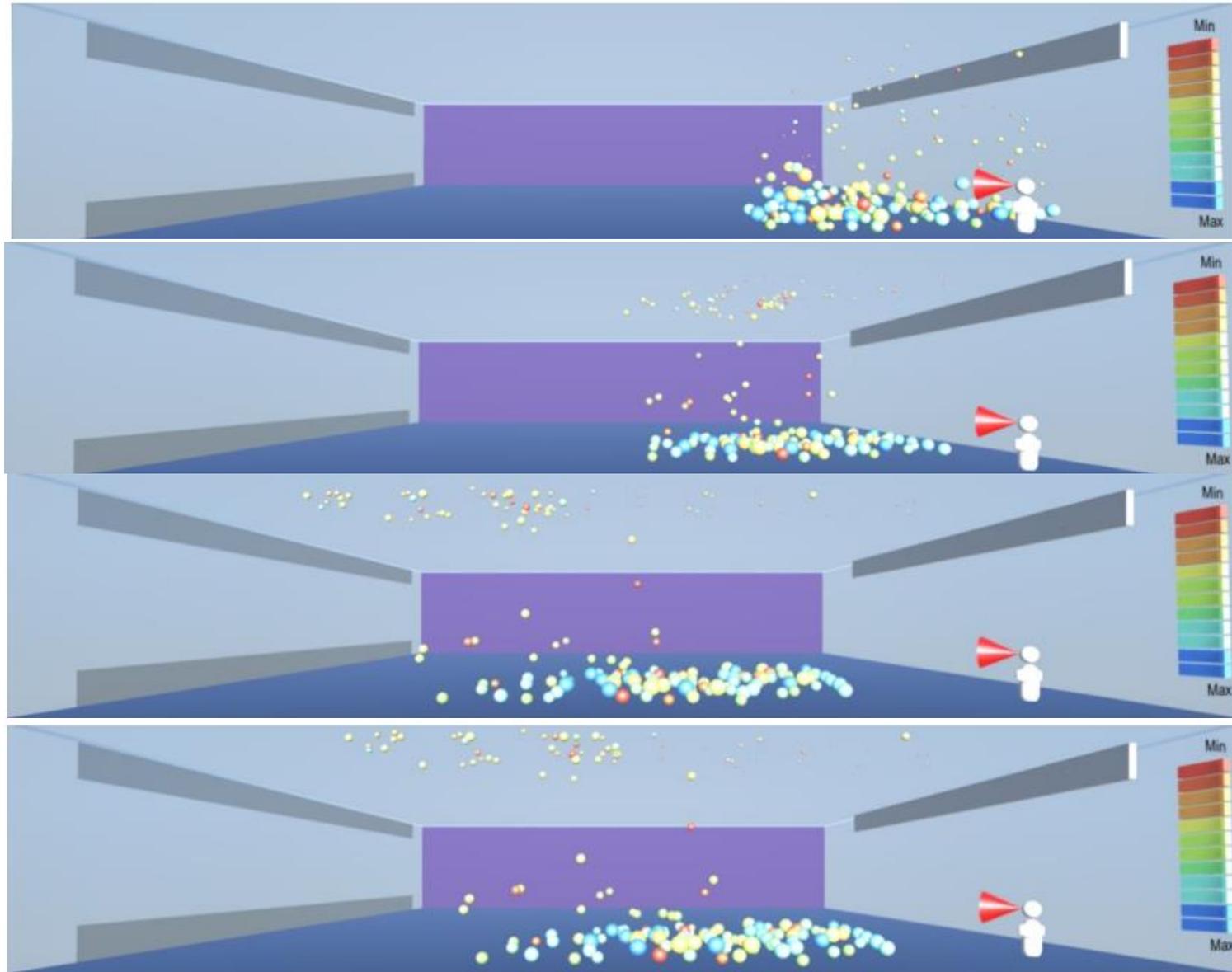


Nel secondo caso si ha si osserva come i droplet, sia leggeri che pesanti, sembrano disporsi in **modo casuale in altezza** e successivamente **ricadono** sul pavimento.



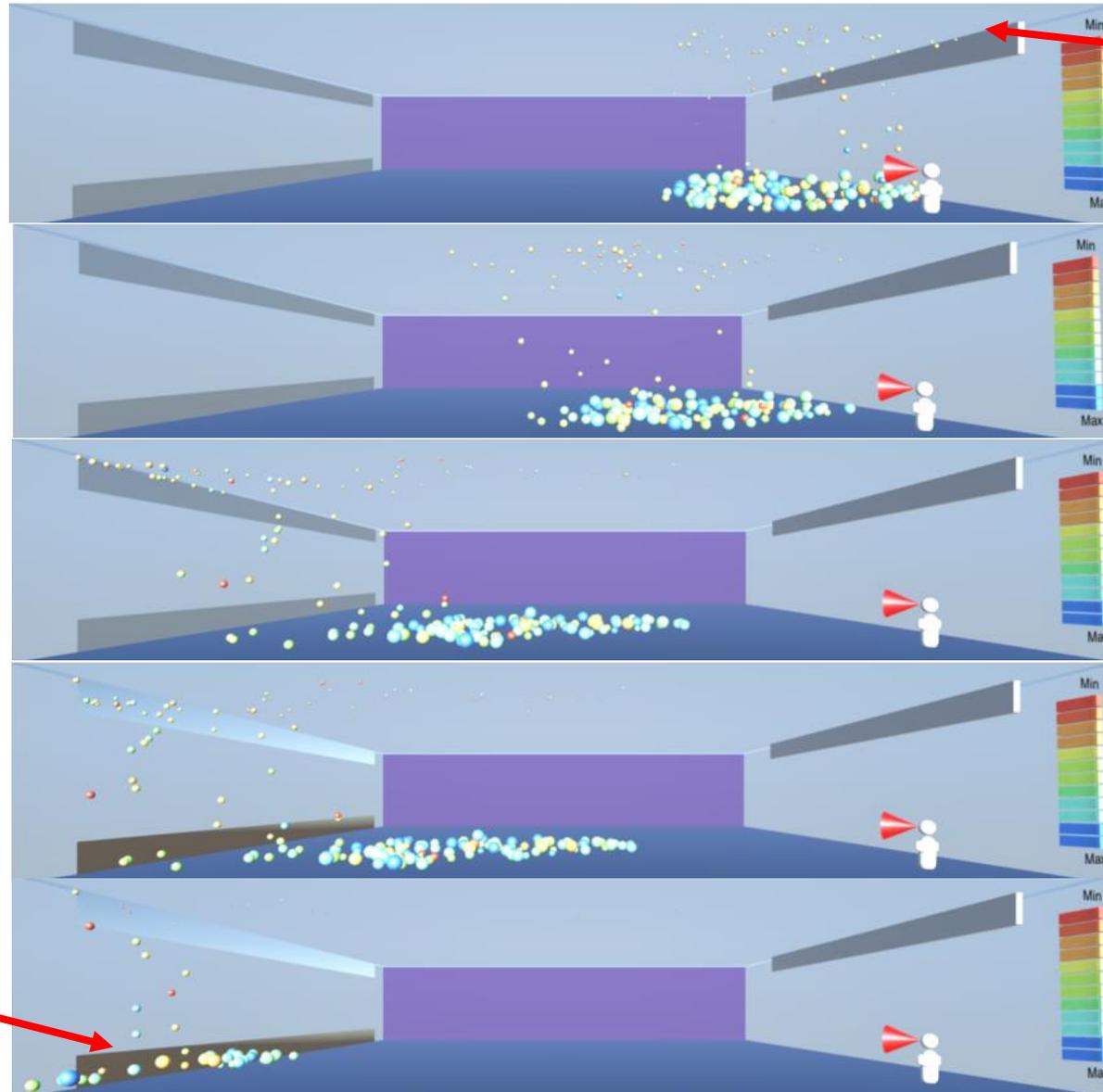
Effetti della distribuzione dell'aria sulla diffusione dei droplet

Nelle figure seguenti si simulano i percorsi dei droplet immessi nella stanza con formazione di aerosol.



Effetti della distribuzione dell'aria sulla diffusione dei droplet

Si simula il movimento dei droplet per effetto della distribuzione uniforme dell'aria.

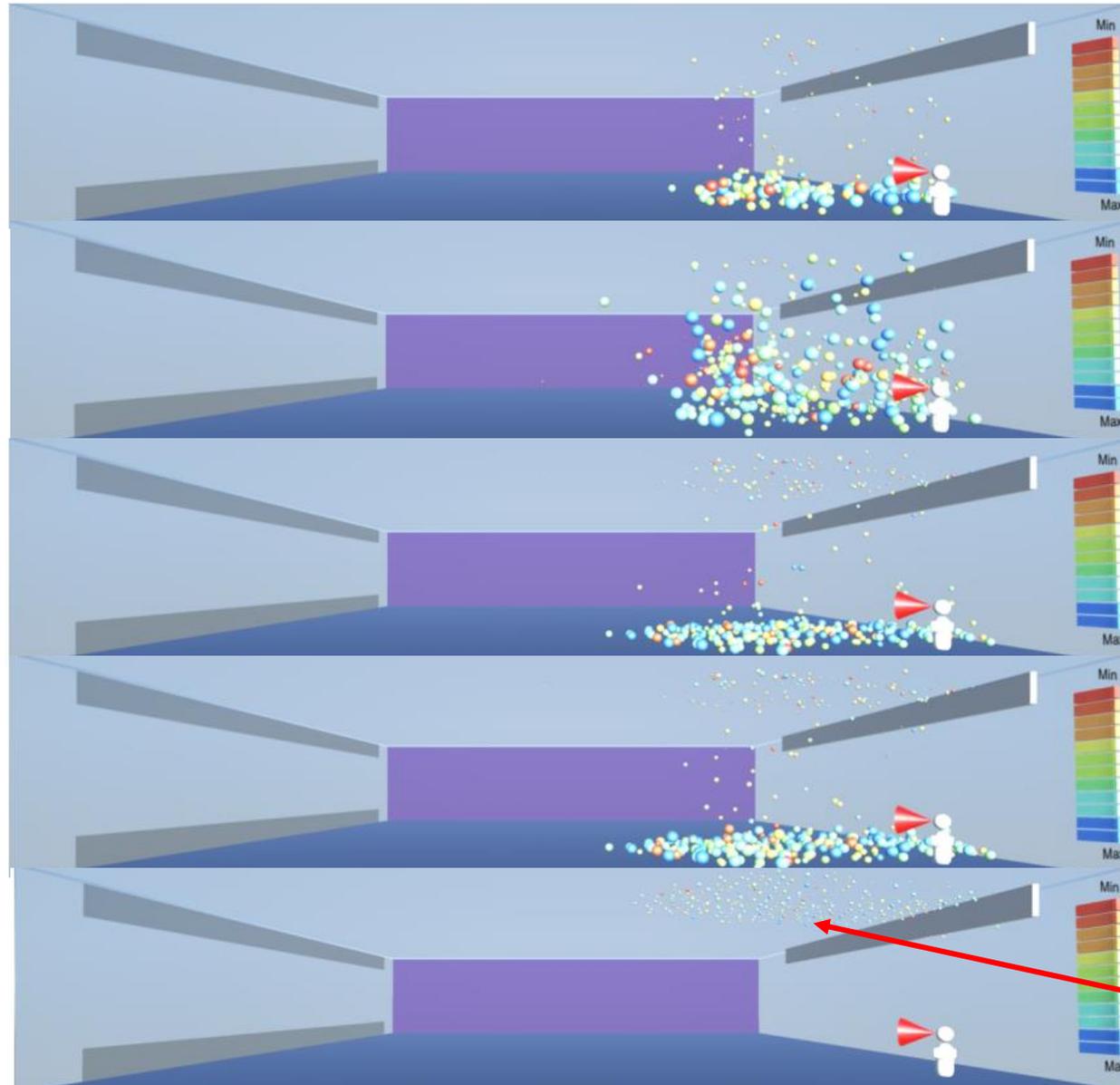


Bocchetta di mandata

Bocchetta di ripresa

Effetti della distribuzione dell'aria sulla diffusione dei droplet

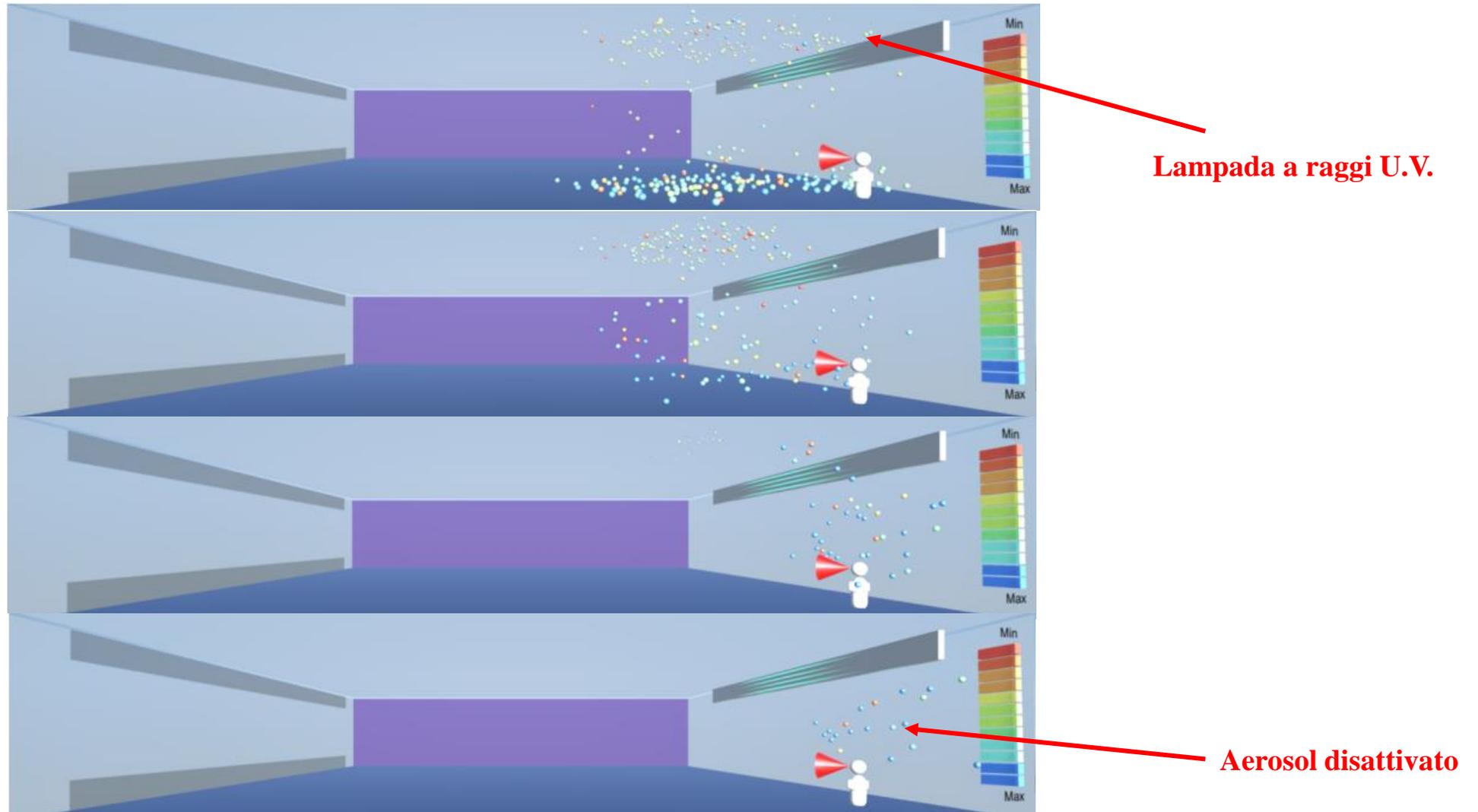
Si simulano gli effetti dell'evaporazione dei droplet e della formazione dell'aerosol.



Formazione dell'Aerosol

Effetti della distribuzione dell'aria sulla diffusione dei droplet

Effetti della **radiazione ultravioletta (U.V.)**. I droplet evaporati che si spostano verso il soffitto sono gradualmente **disattivati** dei virus ancora presenti nei **droplet-nuclei**. La **disattivazione dipende dalla distanza e dal tempo**. I droplet distanti dalla sorgente di raggi U.V. non sono disattivati.



LA VENTILAZIONE IN PRESENZA DI CONTAGIO

RELAZIONE DI CALCOLO DELLA PROBABILITÀ DI CONTAGIO

Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities

**Recommendations of CDC and the Healthcare Infection Control
Practices Advisory Committee (HICPAC)**

**U.S. Department of Health and Human Services
Centers for Disease Control and Prevention (CDC)
Atlanta, GA 30333**

Relazioni di calcolo per la probabilità di contagio

Fin dalla prima pubblicazione della **Nightingale**, del **1857**, sulla ventilazione negli ospedali per combattere il contagio dalla **tubercolosi**, si era compreso che per ridurre i contagi occorreva **ventilare gli ambienti** molto di più della semplice ventilazione per fabbisogni fisiologici.

In quel periodo non esistevano gli impianti di ventilazione meccanica e bisognava utilizzare al massimo la ventilazione naturale dimensionando opportunamente le finestre e disponendo i locali in modo da favorirla.

Occorre analizzare il problema della trasmissione dell'infezione costruendo un modello matematico che, in modo semplificato ma affidabile, consenta di calcolare la probabilità di contagio quando i **suscettibili** vengono a contatto (cioè sono nelle vicinanze) di un contagiato.

Sono stati proposti molti modelli a partire da quello proposto da **Walls-Riley**, nel 1957 e rivisitato nel 1978, fino al modello di **Gammaitoni – Nucci**, proposto nel 1997, che sarà esaminato nel prossimo capitolo,

Con la diffusione della **COVID 19** (*malattia da coronavirus 1919*) molti studi sono stati effettuati per perfezionare i modelli matematici adattandoli alle caratteristiche del virus **SARS-COV-2** (*Sindrome di respirazione acuta severa da coronavirus 2*).

In questa sede non si desidera affrontare il problema **epidemiologico** della diffusione nel tempo del virus nella popolazione ma **come si diffonde il contagio all'interno di spazi chiusi e come sia possibile ridurre la probabilità di contagio dovuta alla presenza di infetti all'interno**. E' quest'ultimo aspetto che interessa la **corretta progettazione degli impianti di condizionamento e/o ventilazione**.

Relazioni di calcolo per la probabilità di contagio – I quanta

Si vedranno nelle prossime slide varie relazioni di calcolo della **probabilità di contagio** basate su un modello di rappresentazione della **dose di infezione** denominata **quantum di infezione**. Questo concetto, fruttuoso nel 1958 e nel 1978 quando furono presentate le relazioni di calcolo della probabilità di contagio, fu generalmente accettato come valido e produttivo per diversi modelli di calcolo. Tuttavia, la formulazione del concetto dei **quanta di infezione** appare oggi molto semplificato, analogo alla concentrazione del patogeno nell'aria che non può da sola rappresentare la complessità del fenomeno trasmissivo:

Infetto — Patogeno — Soggetto suscettibile

Le relazioni di calcolo risultano appropriate solamente quando il **problema infettivo** può essere rappresentato con una **risposta esponenziale** di dose assorbita, ossia quando una grande dose in un tempo breve è equivalente ad una piccola dose per un tempo lungo.

Tutti i modelli di calcolo che saranno esposti nei prossimi capitoli si basano sulla distribuzione dei contagi secondo una curva del tipo di **Poisson**, cioè rispettano la forma analitica:

$$P = 1 - e^{-\mu}$$

ove l'esponente μ è il **fattore di Poisson** che sarà determinato diversamente dai vari modelli di calcolo.

Negli sviluppi delle relazioni di calcolo si ingloba nel concetto di **quanta di infezione**, come già osservato, non solo la **quantità del patogeno** ma anche la sua **infettività** (diversa da 1 per i virus e pari ad **1 per la tubercolosi**). **I quanta di infezione racchiudono in sé tutta la** problematica epidemiologica della possibile infezione.

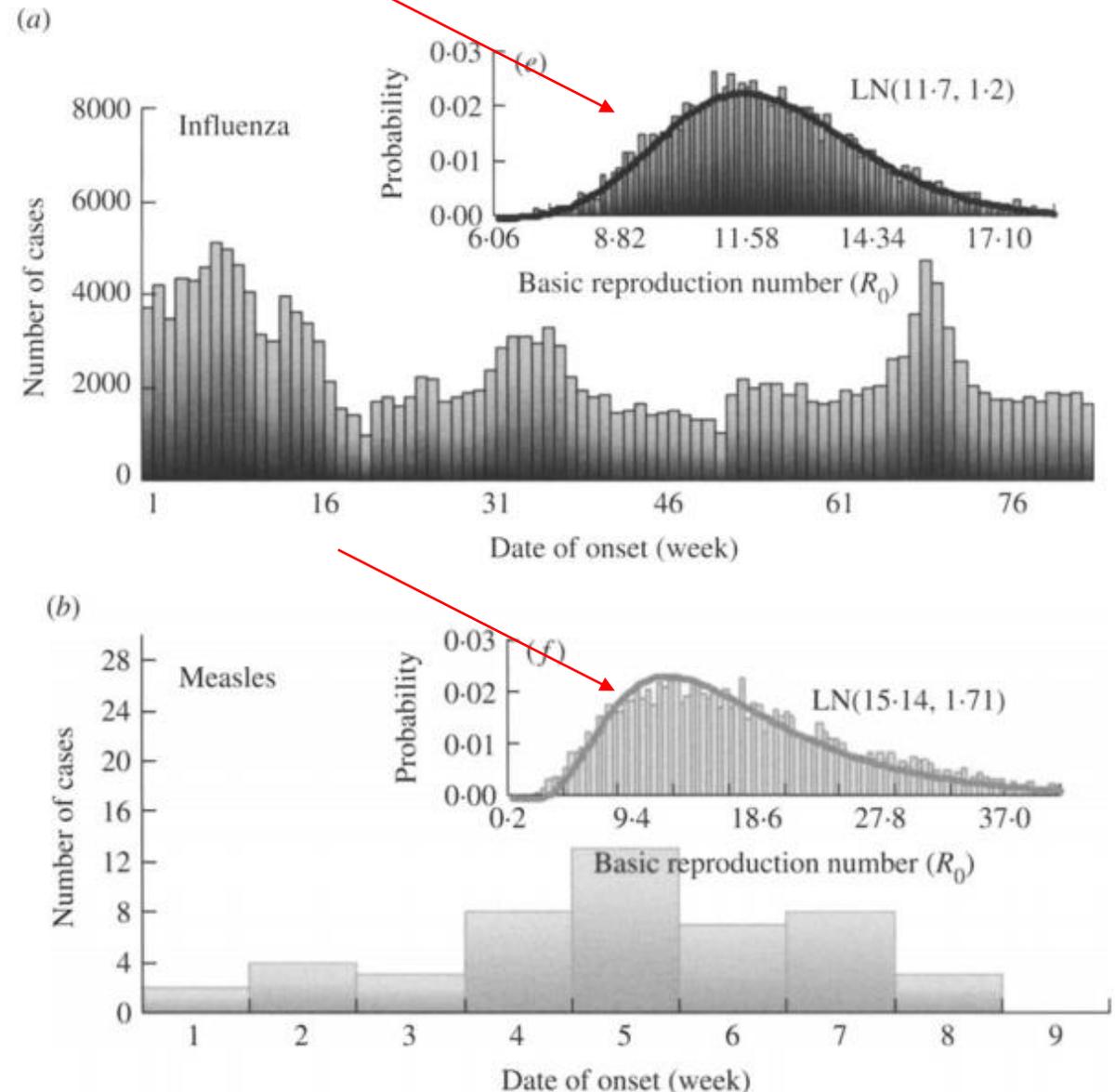
Relazioni di calcolo per la probabilità di contagio – I quanta

La **distribuzione di Poisson** è regolarmente seguita nella distribuzione dei casi di infezione da virus per via aerea. In figura si hanno due distribuzioni per infezioni da **influenza** e da **morbillo** in una scuola di New York (**Walls – Riley, 1978**) avente un volume di 600 m³, un numero di persone suscettibili n=50, attività di respirazione p=0.38 m³/h.

Le curve relative al **numero di riproduzioni, R₀**, in funzione della probabilità di contagio sono del tipo della distribuzione di **Poisson**:

Quest'osservazione è alla base della formulazione dei diversi modelli di calcolo che si esamineranno fra breve.

$$P = 1 - e^{-\mu}$$



Relazioni di calcolo per la probabilità di contagio – I quanta

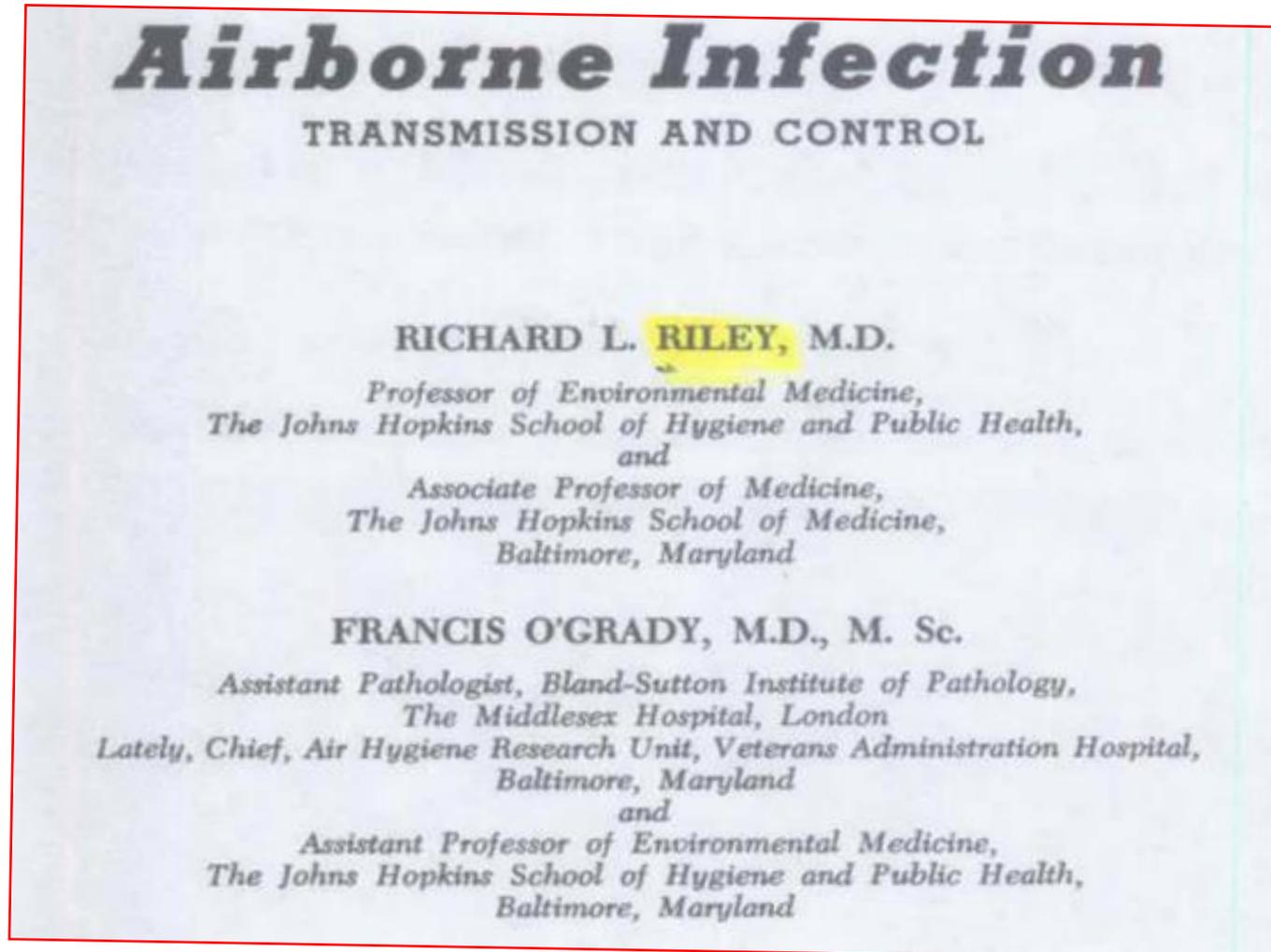
I metodi di calcolo che saranno approfonditi sono essenzialmente due, anche se ne esistono diverse varianti specifiche che non esamineremo in questa sede:

1. **Metodo di Walls- Riley:** storicamente il primo ad essere proposto nel 1976 e fra i più utilizzati. In questo modello si introduce il concetto dei **quanta** derivato proprio dalla forma analitica di Poisson. Questo metodo risulta abbastanza semplice e molte associazioni internazionali (*ASHRAE, REHVA, CDC,*) lo indicano come modello di riferimento;
2. **Metodo di Gammaitoni – Nucci:** è un metodo di calcolo più aggiornato del precedente, 1997, ed ampiamente apprezzato per le ipotesi di calcolo avanzate non presenti nel modello precedente. Si hanno due formulazioni denominate come **variante A)**, più semplice e vicina al modello di **Walls-Riley**, e **variante B)** che tiene conto delle condizioni transitorie e di un possibile numero iniziali di **quanta**, N_0 ;

A solo scopo euristico si menziona il **Metodo di Rudnick – Milton**. È un modello di calcolo diverso dai dagli altri perché si fonda su un'ipotesi di calcolo diversa, originale e innovativa. Si basa, infatti, sull'attività di respirazione ed espirazione dei presenti in un locale. Attraverso la respirazione si emettono i **droplet** che trasmettono il contagio. Un metodo semplice ed affidabile per risalire all'attività di respirazione è il tracciamento della **CO₂**, emessa per espirazione, attraverso opportuni sensori biometrici. In particolare, risulta importante risalire alla differenza di concentrazione $\Delta C = C - C_0$ per ottenere un parametro, denominato **f**, utile per formulare ancora una volta un modello nella forma di **Poisson**.

LA VENTILAZIONE IN PRESENZA DI CONTAGIO

RELAZIONE DI WALLS - RILEY



Relazione di Walls- Riley Si assuma che nell'ambiente

Nell'ambiente si abbia **ventilazione omogeneamente miscelata** di tipo meccanico. Siano ancora:

- Q portata di ventilazione, (m^3/h);
- V volume dell'ambiente, (m^3);
- q **quantum generation rate**, (quanta/h);
- N concentrazione di quanta all'interno, (quanta/ m^3);
- N_0 concentrazione di quanta all'esterno, (quanta/ m^3);
- I Numero di persone infette.

L'equazione di bilancio è:

$$V \frac{dN}{dt} = Iq - NQ$$

Che possiamo scrivere:

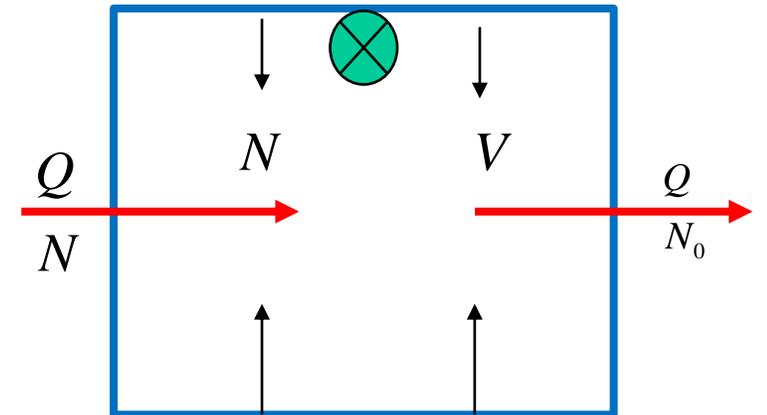
$$\frac{dN}{Iq - NQ} = \frac{1}{V} dt$$

Integrando si ha:

$$\int_0^N \frac{dN}{Iq - NQ} = \frac{1}{V} \int_0^t dt$$

Le condizioni iniziali sono: $N=0$ per $t=0$.

Ponendo $u = Iq - NQ$ si ha il seguente sviluppo.



Relazione di Walls- Riley

Si hanno i seguenti passaggi:

$$\frac{du}{dN} = -Q$$

$$dN = \frac{-du}{Q}$$

$$-\frac{1}{Q} \int_0^N \frac{du}{u} = \frac{t}{V}$$

$$\ln \left(\frac{Iq - NQ}{Iq - N_{t=0}Q} \right) = -\frac{Q}{V}t \quad \text{con } N_{t=0} = 0$$

Posto $\lambda = \frac{Q}{V}$ si ottiene:

$$\ln \left(I - \frac{NQ}{Iq} \right) = -\lambda t$$

E finalmente si ha: $I - \frac{NQ}{Iq} = e^{-\lambda t}$

Da cui deriva la relazione di **Walls- Riley (1957)** che calcola $N(t)$ per dato volume:

$$N(t) = \frac{Iq}{Q} \left(I - e^{-\lambda t} \right)$$

Relazione di Walls- Riley

I **quanta** emessi per respirazione, \bar{N} , sono dati dall'integrale:

$$\bar{N} = \frac{1}{t} \int_0^t N dt$$

Sostituendo la precedente relazione e procedendo nei calcoli si ottiene:

$$\bar{N} = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{Iq}{Q} (I - e^{-\lambda t}) dt$$

$$\bar{N} = \frac{Iq}{Qt} \left[t - \left(\frac{I}{-\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^t \right) \right]$$

da cui, infine:

$$\bar{N} = \frac{Iq}{Qt} \left(1 - \frac{I}{\lambda} (I - e^{-\lambda t}) \right)$$

Definendo la **probabilità di contagio** secondo la **distribuzione di Poisson** (distribuzione casuale delle particella infettanti in aria) si ha :

$$P = 1 - e^{-\bar{u}} \quad \text{con} \quad \bar{u} = Q_b t_{\text{exp}} \bar{N} \quad \text{con } Q_b \text{ portata di respirazione, si ottiene}$$

con Q_b portata di respirazione. Da questa otteniamo:

$$P = 1 - e^{-\left[\frac{Q_b I q t_{\text{exp}}}{Q} \left(I - \frac{I}{\lambda t} \right) (I - e^{-\lambda t}) \right]}$$

Relazione di Walls- Riley

In **condizioni stazionarie** si ottiene la relazione di **Walls – Riley**:

$$P = 1 - e^{\left(-\frac{Q_b I q t_{\text{exp}}}{Q} \right)}$$

Questa relazione può anche essere scritta nella forma più conosciuta:

$$P = \frac{I}{S} = 1 - e^{\left(-\frac{I q p t_{\text{exp}}}{n \cdot V} \right)}$$

Con:

- I numero di casi che sviluppano infezione;
- S numero di persone suscettibili;
- I numero di persone infette;
- p portata di ventilazione polmonare per persona, (m^3/h), prima indicata con Q_b ;
- Q portata di ventilazione dell'ambiente, (m^3/h), $Q=nV$;
- q numero di quanta prodotti da un infetto, ($\text{quanta}(\text{h})$);
- t_{exp} tempo totale di esposizione, (h);
- n Numero di ricambi orari, (Vol/h);
- V Volume dell'ambiente, (m^3).

Relazione di Walls- Riley – la forma esponenziale

La forma matematica di tipo esponenziale della relazione di **Walls-Riley** non è quindi casuale. Essa deriva, come visto in precedenza, dalla distribuzione di **Poisson** per il numero di infetti, nella forma:

$$P = 1 - e^{-\mu}$$

Dall'esponente della relazione di **Walls-Riley** possiamo indicare con:

$$N = \frac{Iqp}{nV}$$

Nel tempo t si ha il **valore medio**:

$$\bar{N} = \frac{I\bar{q}p}{nV}$$

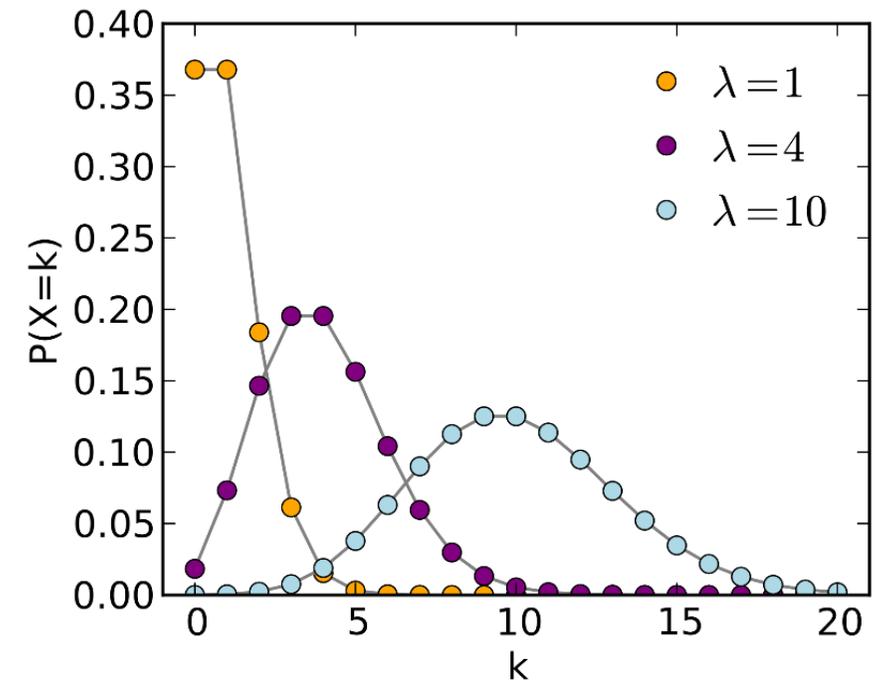
ove \bar{q} è il numero di **quanta/h** mediato nel tempo t .

Il fattore di **Poisson**, μ , può essere scritto nella forma:

$$\bar{\mu} = \bar{N}t$$

E sostituendo i valori si ritrova la relazione di **Walls-Riley**:

$$P = 1 - e^{-\frac{I\bar{q}pt}{nV}}$$

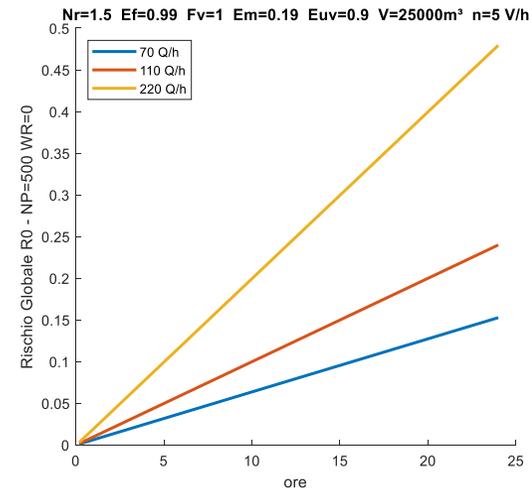
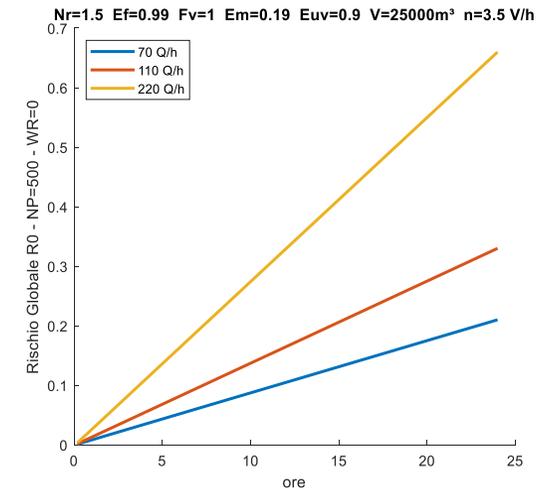
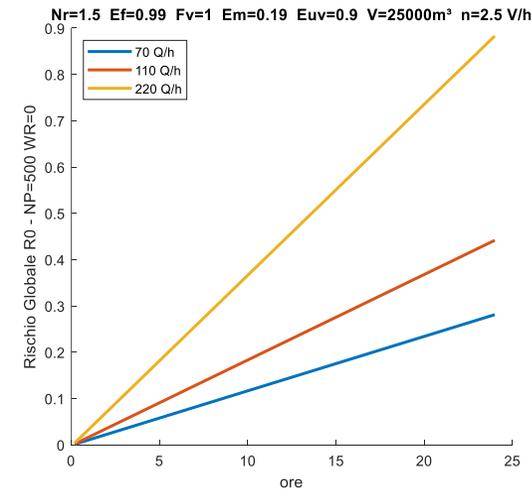
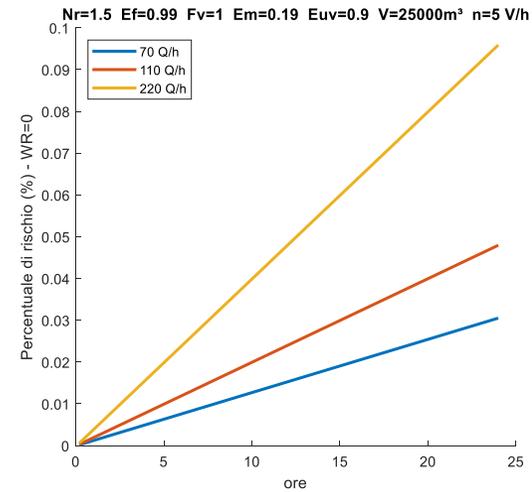
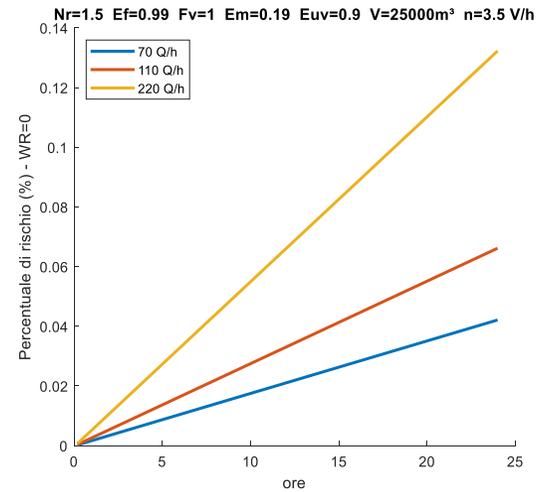
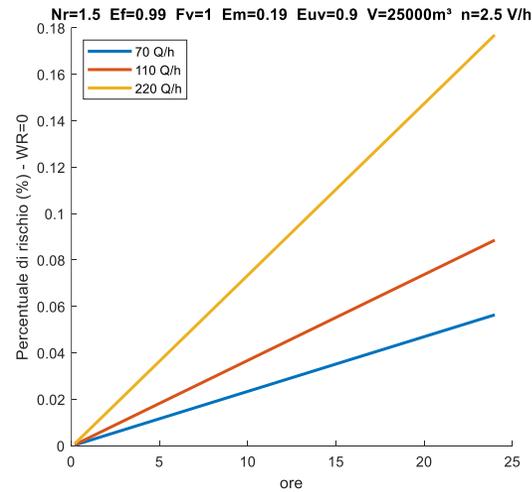


Relazione di Walls- Riley – Numero di riproduttività R_{A0}

Il numero di riproduttività, R_0 , corrisponde al numero di infezioni secondarie che si verificano quando è presente **un singolo infetto** all'interno di un locale ove sono presenti **N** individui in totale.

$$R_0 = (N - 1) \left(1 - e^{-\frac{\bar{I}qpt}{nV}} \right)$$

Il numero di casi di riproduzione è proporzionale al numero totale meno l'infetto, **N-1**.



Relazione di Walls- Riley – Stima dei quanta

Il tasso di generazione dei **quanta**, q , spesso non è noto *a priori*, ma **stimato epidemiologicamente** da un caso di epidemia in cui il tasso di attacco della malattia viene sostituita con la probabilità di contagio, P . Se il tempo di esposizione e la velocità di ventilazione sono noti, il tasso di generazione di **quanta** della malattia può essere calcolato, all'inverso, dall'equazione di **Walls-Riley**.

Seguendo la definizione di **Walls** (1955), un **quantum** è un'unità che descrive **il numero di particelle infettive** (o il numero di agenti patogeni presenti nell'aria). Quindi, il termine esponenziale nell'equazione di **Walls-Riley** non è senza dimensioni ma ha l'unità di *numero di particelle infettive* e, in particolare:

- c'è un termine di **infettività unitaria**, con le unità di particelle infettive, in termini esponenziali.
- il termine di **infettività** è implicitamente incluso nel tasso di generazione di **quanta** calcolato all'indietro nell'equazione, cioè:

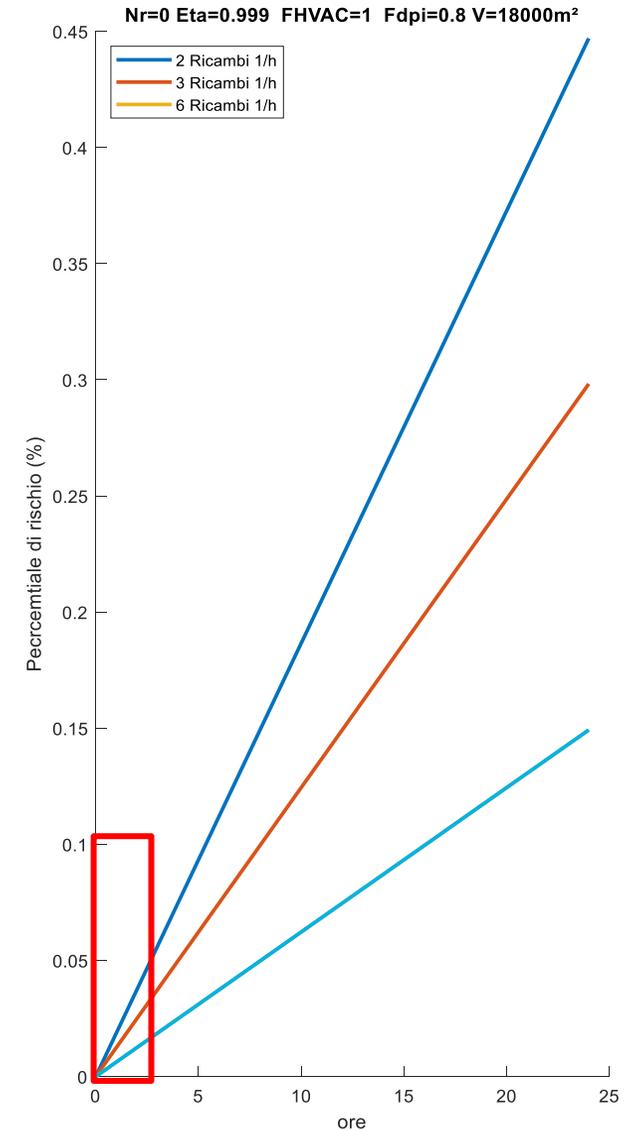
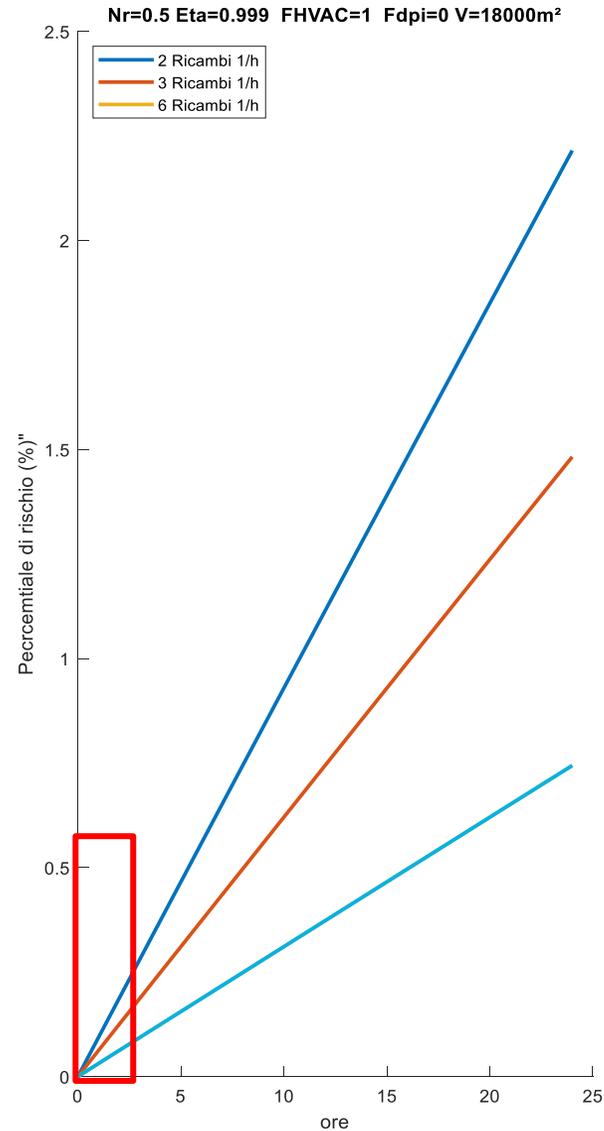
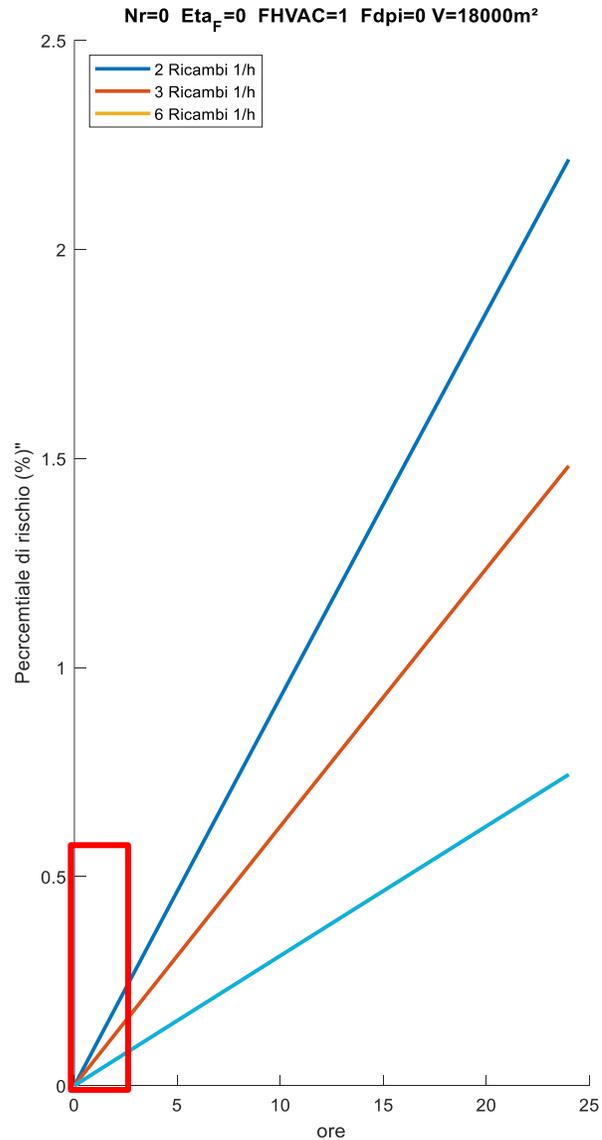
$$q = \text{termine di infettività} \cdot \text{numero di quanti} / \text{tempo unitario}$$

Il **termine di infettività** potrebbe non essere unitario. Il **termine di infettività** descrive la **probabilità di ciascuna particella infettiva ad iniziare l'infezione**.

Va osservato che un **termine di infettività unitaria** implica che **l'ospite è completamente vulnerabile al patogeno**. Questo caso rende adatta l'equazione di **Walls-Riley** solo per malattie, come la *tubercolosi*, che soddisfano questa condizione (Huebner et alii, 1993).

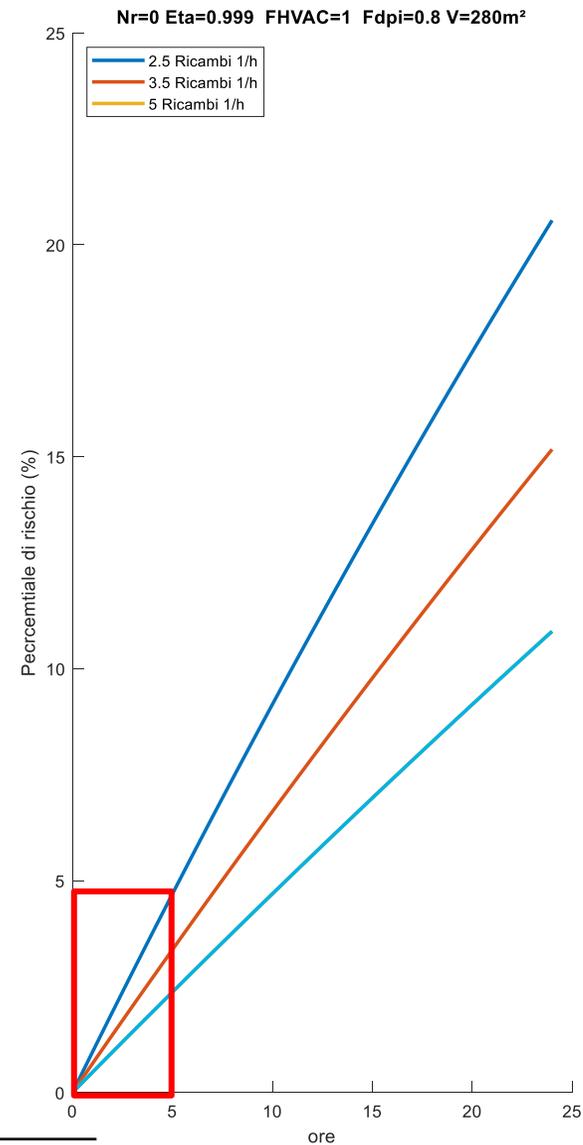
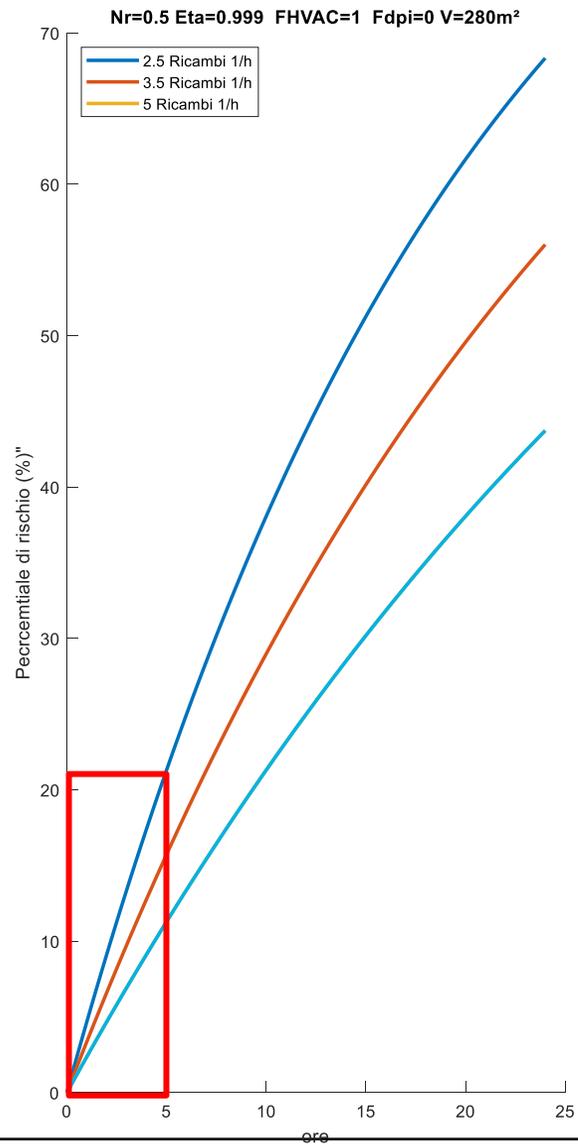
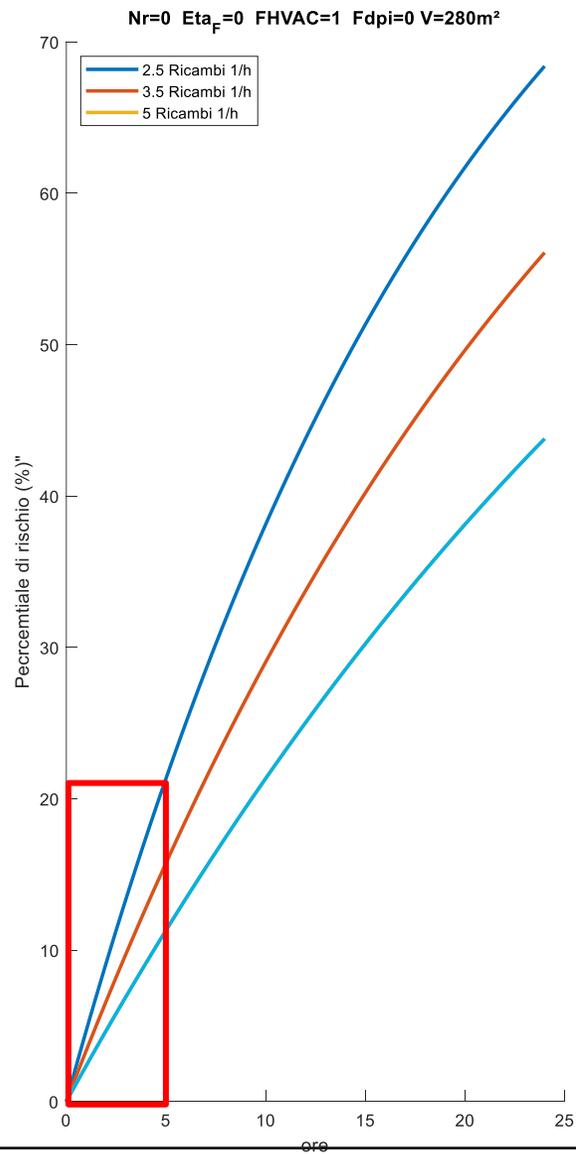
Relazione di Walls- Riley - Supermercato

Esempio di calcolo del rischio di contagio per un supermercato da 18000 m³ per varie portate di ricambio d'aria



Relazione di Walls- Riley – Aula scolastica

Calcolo del rischio di contagio per un'aula scolastica da 280 m³ per vari ricambi d'aria.



Relazione di Walls- Riley – Considerazioni

Dal confronto dei tre casi precedenti si possono fare alcune **osservazioni importanti**:

1. Il rischio **decrece** al **crescere del volume** dell'ambiente;
2. Il rischio **decrece** al **crescere del numero di ricambi orari di aria esterna fresca**;
3. Il rischio **decrece** al **riducendo la produzione dei quanta**, quindi ***parlando poco e bassa voce, non svolgendo attività fisica che aumenti l'attività polmonare***;
4. Il rischio **decrece** al **decrescere del tempo di permanenza** nell'ambiente.
5. E' **da preferire la ventilazione meccanica** a quella **naturale** perché quest'ultima è poco affidabile e dipende fortemente dalle condizioni atmosferiche esterne. Inoltre, in inverno è poco praticabile poiché la temperatura dell'aria esterna è bassa.

Calcolo del Numero di ricambi orari per dato rischio di contagio

Utilizzando la relazione di **Walls-Riley** nella forma normale si può calcolare il **numero di ricambi d'aria**, N_r , necessari per ottenere **una assegnata probabilità di contagio**, a pari condizioni di esercizio dell'ambiente.

Infatti, è possibile ricavare la relazione:

$$N_r = - \frac{Iqpt_{\text{exp}}}{V} \cdot \frac{1}{\ln(1-P)}$$

ove vale il simbolismo visto in precedenza e P è la probabilità di contagio assegnata.

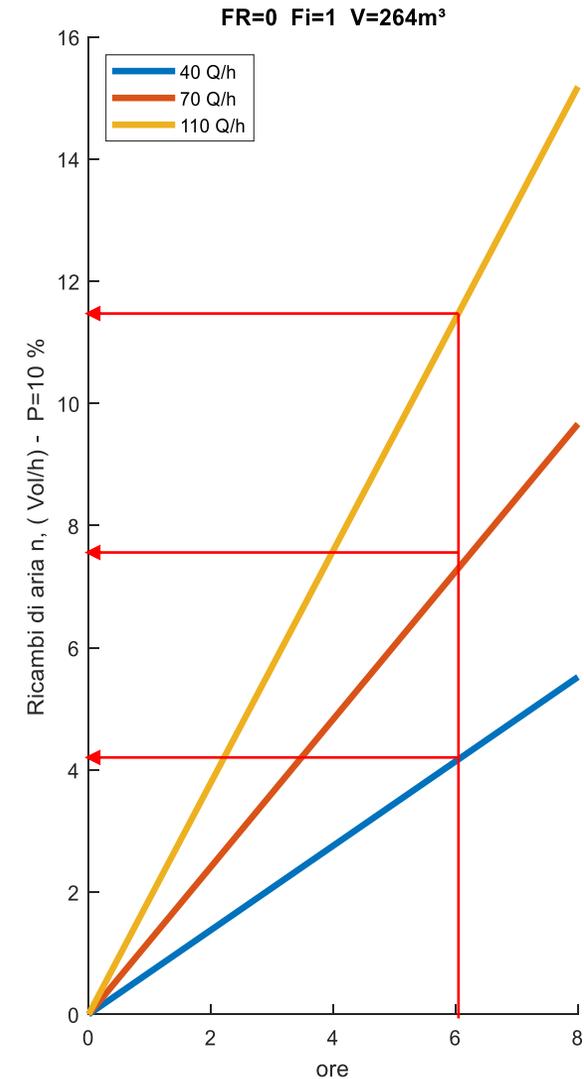
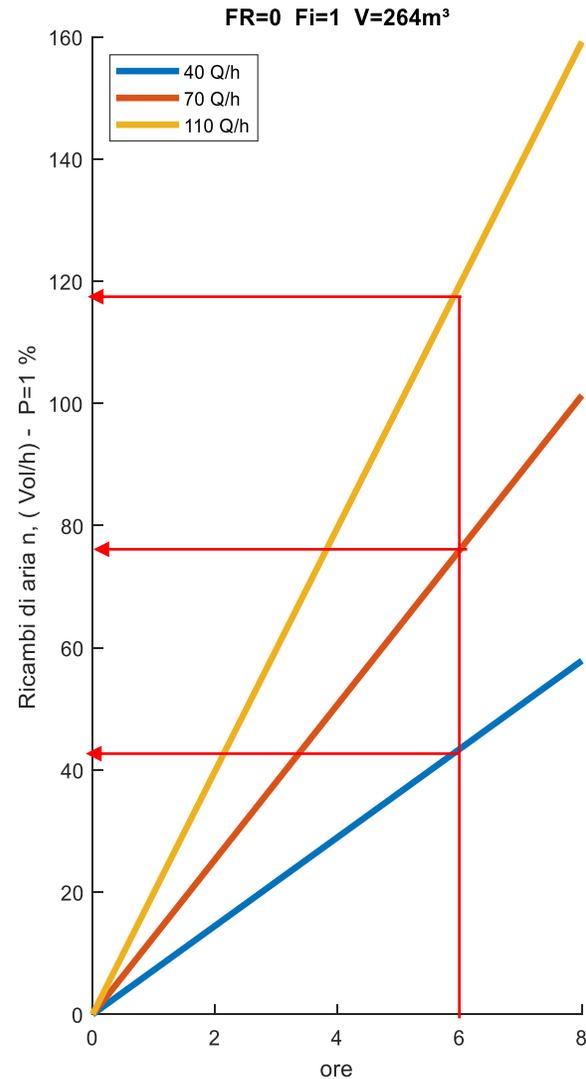
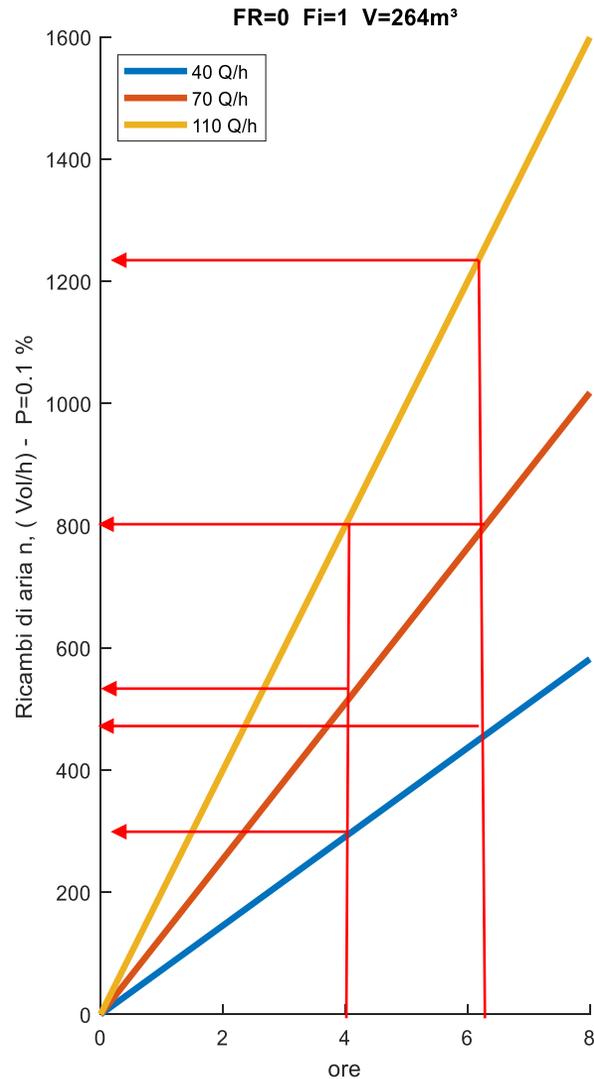
Si mantiene costante il volume V dell'ambiente, la portata di respirazione, p , e facciamo variare il *tempo di esposizione*, t_{exp} , e il numero dei **quanta/h**.

Si utilizza la relazione semplice di **Walls-Riley** perché la forma modificata (di cui si parlerà nel prosieguo) porta ad una relazione implicita con alcuni termini funzioni della stesso numero di ricambi orario incogniti e pertanto il calcolo dei **quanta/h** diviene sottostimata.

Si vedranno alcuni esempi per le tipologie di locali più significative.

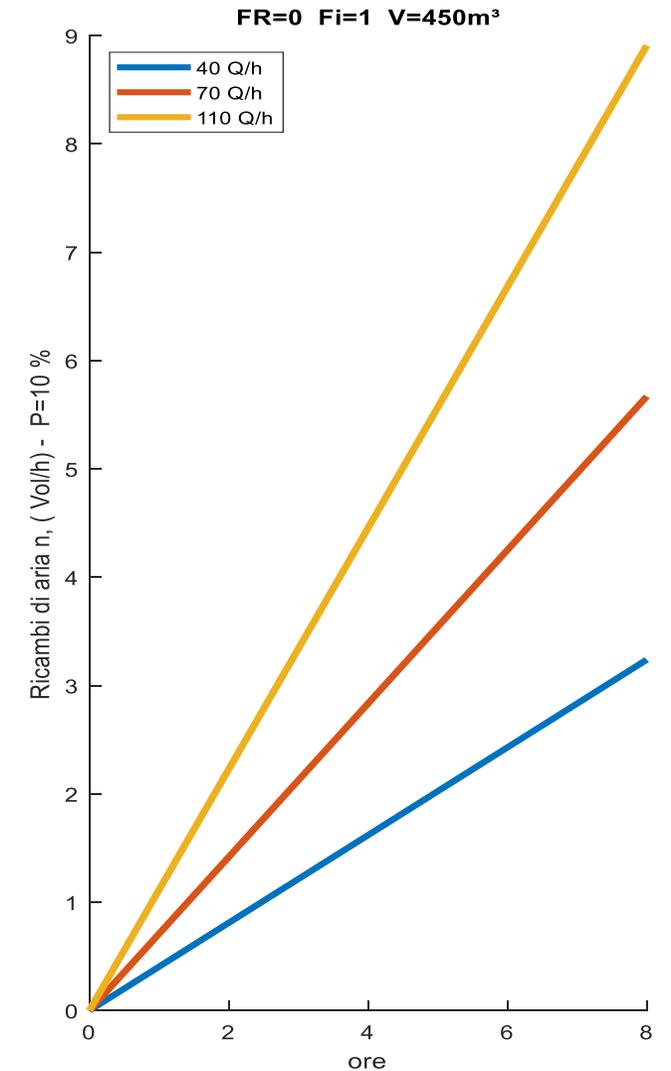
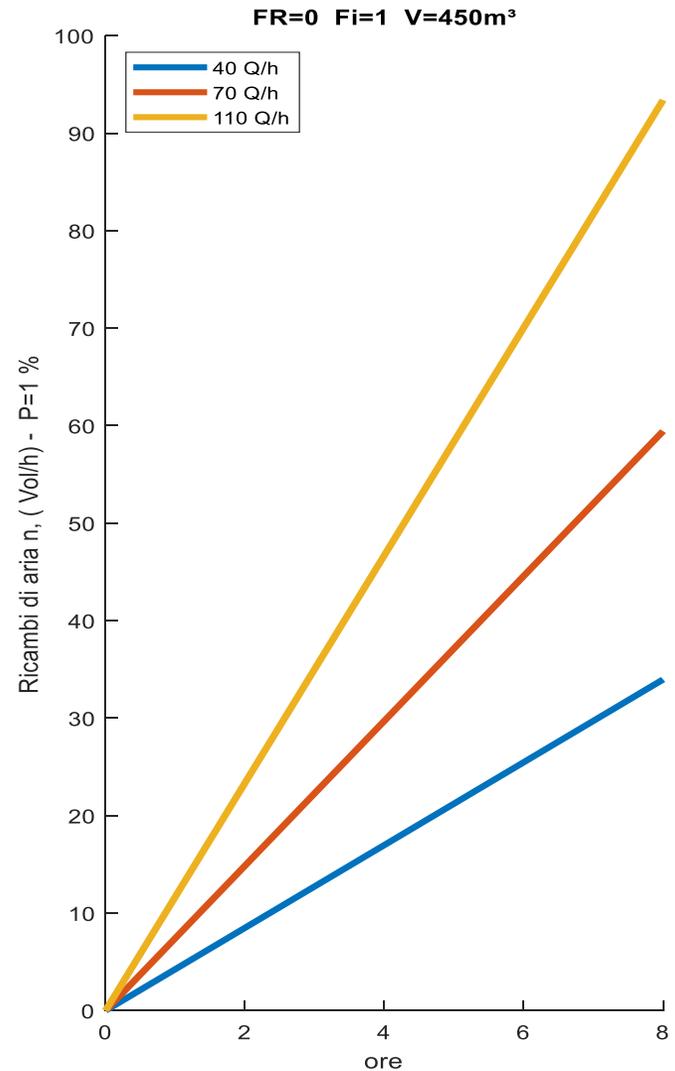
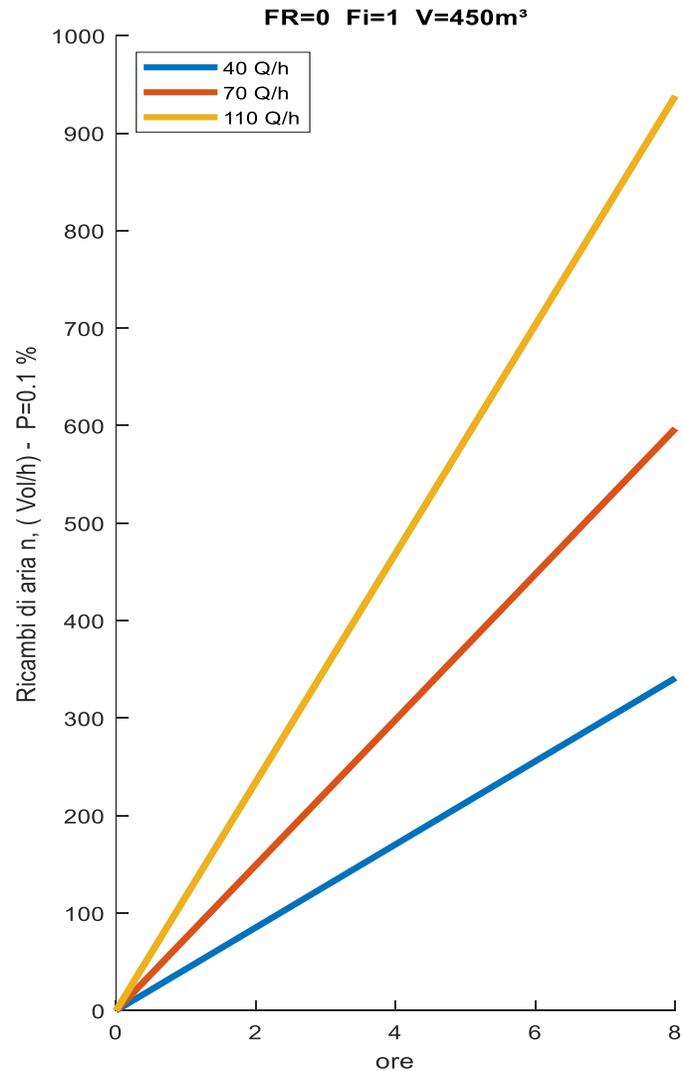
Calcolo del Numero di ricambi orari per un'aula scolastica

Per un'aula da **264 m³** si hanno i seguenti abachi per carichi virali variabili da 40 a 100 quanta/h.



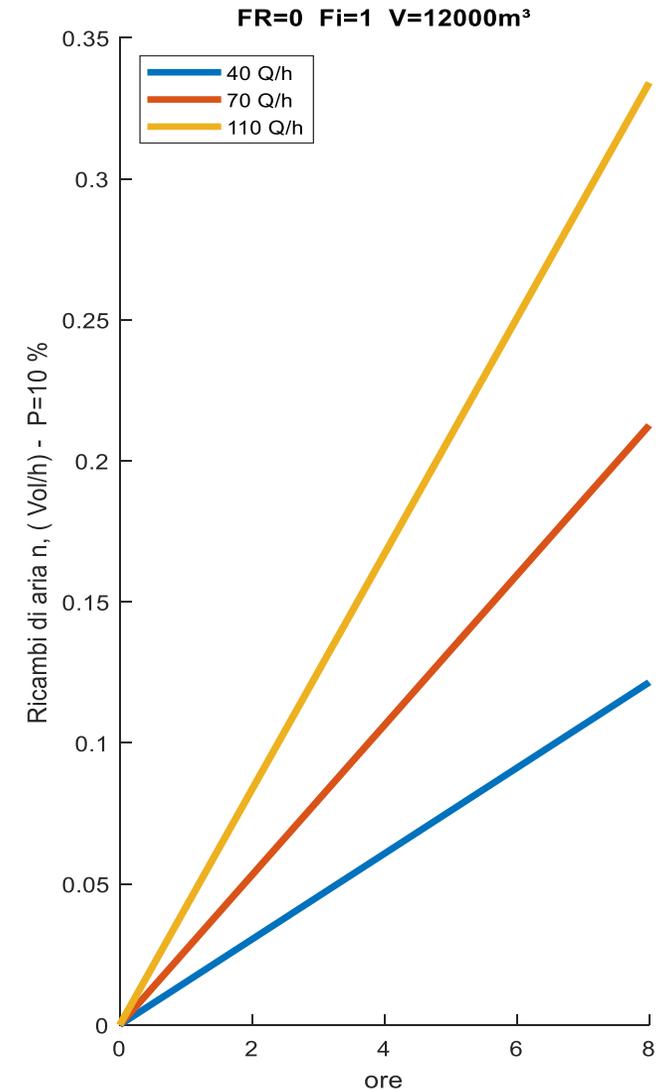
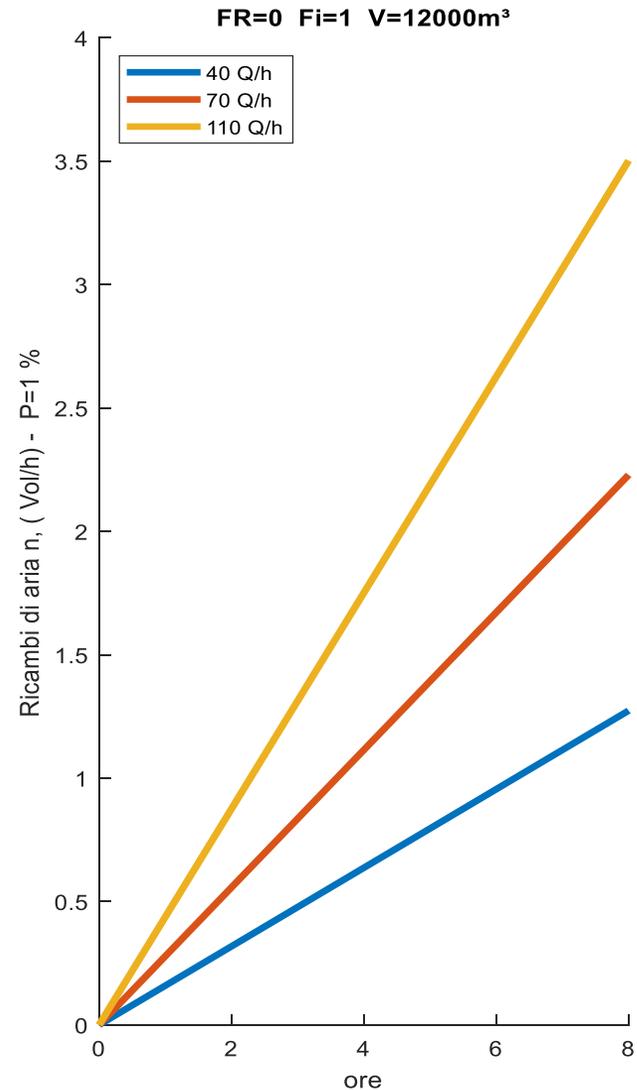
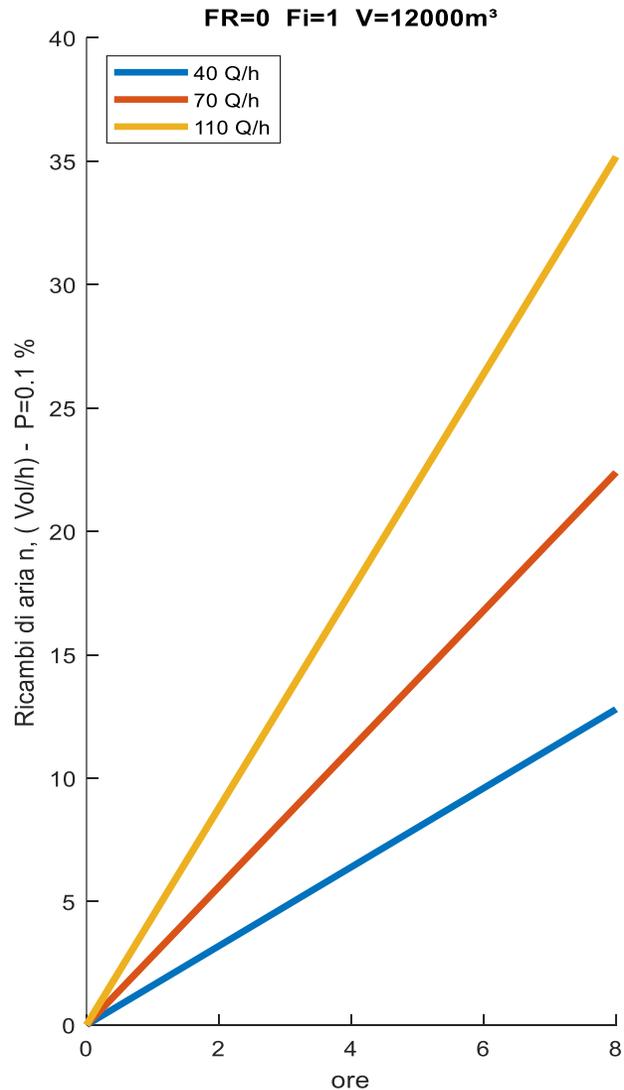
Calcolo del Numero di ricambi orari per un negozio

Per un negozio da 450 m^3 si ha gli abachi delle figure seguenti.



Calcolo del Numero di ricambi orari per un supermercato

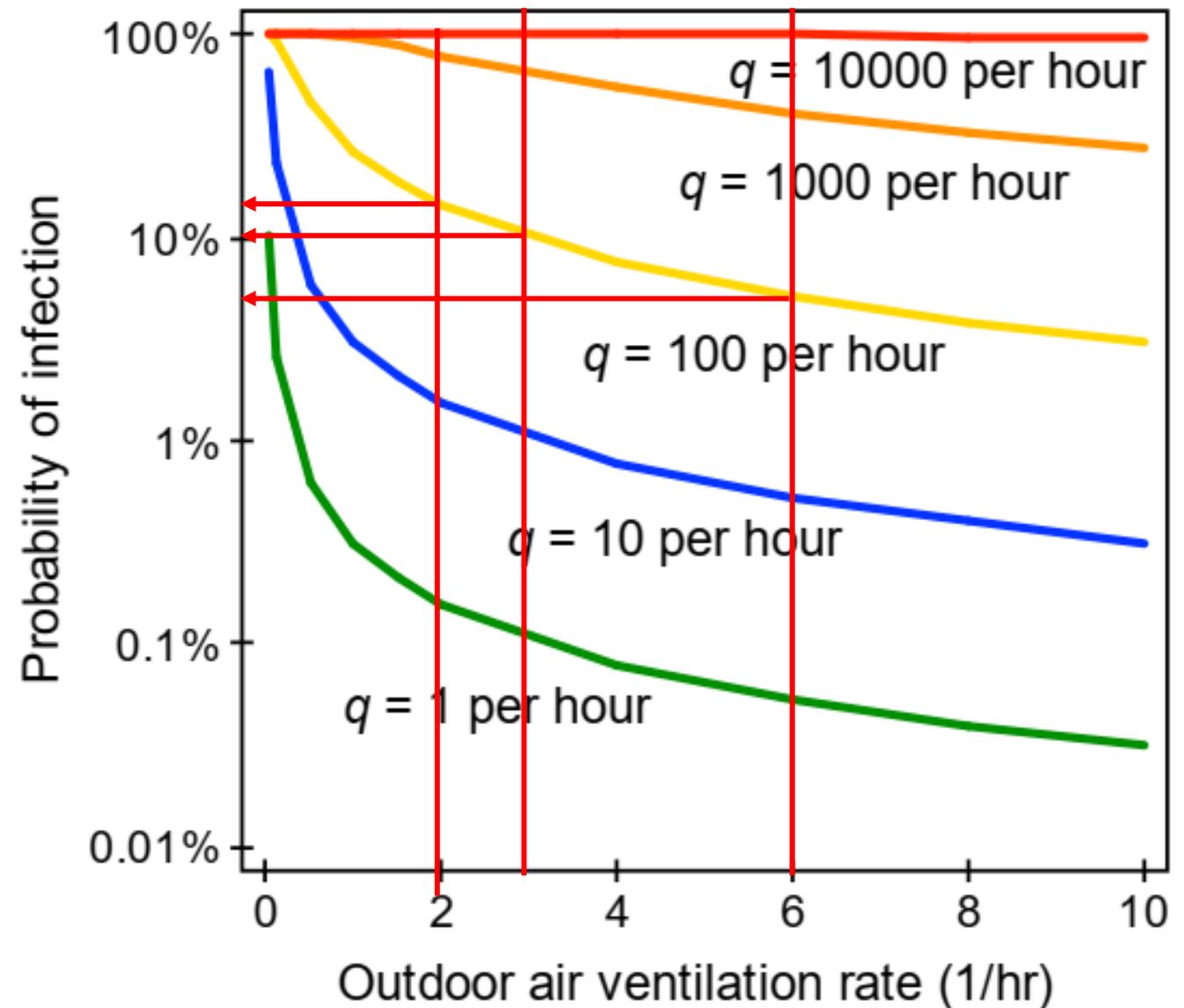
Per un supermercato da **12000** m³ si hanno gli abachi seguenti.



Relazione di Walls- Riley – Numero di ricambi orari

In un rapporto della **NASA Foundation** è possibile visualizzare l'abaco a fianco che riporta la **probabilità di infezione** in funzione del **numero di ricambi orari** dell'aria esterna di ventilazione per vari valori dei **quanta/h**, nell'ipotesi che la portata respiratoria sia **$p=0.48 \text{ m}^3/\text{h}$** e che il soggetto suscettibile permanga **8 ore** in un edificio con superficie di **500 m^2** (**$V=1200 \text{ m}^3$**) destinato a ufficio e ci sia **solo un soggetto infetto**.

In figura si prende in considerazione la curva relativa a **$q=100$ quanta/h** e si evidenziano le probabilità di rischio di contagio con numeri di ricambi pari a **1, 2 e 6**.



Considerazioni sul numero dei ricambi orari

Dagli abachi precedenti ritroviamo confermate le conclusioni esposte per il calcolo diretto del rischio di contagio.

In questo caso, **fissato il rischio P e considerato il volume dell'ambiente** si possono ottenere i **ricambi orari** in ordinate per ogni ipotesi di **quanta/h** considerato.

1. Per l'**aula scolastica da 264 m³** con i normali valori dei ricambi orari (2.5-3.5 a secondo della scuola) **non si ha mai un rischio inferiore al 10%**. Per avere rischi di contagi inferiori occorrerebbe avere un numero di ricambi orari molto elevato, impossibili da realizzare. Per questi motivi valgono i dubbi sulla ventilata «**ripresa sicura**» delle lezioni a settembre con le sole regole passive del distanziamento di 1 m, l'utilizzo delle mascherine e la sanificazione della aule giornaliero.
2. Per il **negoziò da 450 m³** vale ancora quanto detto per il caso precedente. Si hanno rischi di contagio dell'1% con n variabile da 3 a 6 vol/h. L'utilizzo di filtri ad alta efficienza e lampade UV, oltre alla mascherina, contribuirebbe notevolmente a ridurre il rischio da contagio.
3. Per il **supermercato da 12000 m³** non ci sono problemi ad avere un rischio di contagio molto basso (1%) già con 2-3 Vol/h ricambio d'aria. E' il beneficio ottenuto per i grandi volumi e normali ricambi d'aria.

Relazione di Walls – Riley - Limitazioni

La relazione di **Walls-Riley** ha alcune **limitazioni** derivanti dalle ipotesi di base assunte:

- *Condizioni stazionarie raggiunte;*
- *Distribuzione dell'aria perfettamente miscelata;*
- *Distribuzione uniforme dei droplet o dell'aerosol nell'aria.*

Queste ipotesi, nel caso di utilizzo di mezzi protettivi, **filtri dell'aria, mascherine, lampade U.V.** e si consideri il **deposito dei droplet a terra**, possono **sovrastimare** il valore dei **quanta/h** che dalla relazione può essere calcolata.

In realtà, in presenza di protezioni aggiuntive, il calcolo dei **quanta/h** dovrebbe essere corretto dagli effetti di questi stessi termini.

La relazione di **Walls-Riley** è molto utilizzata per la sua semplicità e consigliata da molti manuali internazionali (ad esempio l'**ASHRAE**) ma deve essere sempre valutato il rischio di sottostima dei termini correttivi.

Relazione di Walls – Riley in condizioni non stazionarie

Le precedenti relazioni sviluppate per il metodo di **Walls-Riley** prevedevano le condizioni di stazionarietà nella produzione dei **quanta/h**.

Assumiamo ancora che ci sia una distribuzione dell'aria ben miscelata (*perfect mixing*) e che l'eliminazione delle particelle infettive per effetto della vitalità, filtrazione, deposito dei droplet su terreno (*settling*) ed altri meccanismi di riduzione della carica infettiva siano trascurabili rispetto alla rimozione delle cariche virali per ventilazione.

L'accumulazione della produzione dei quanta è pari alla generazione dei quanta meno la rimozione dei quanta per ventilazione:

$$V \frac{dN}{dt} = I q - N Q$$

ove si ha:

- V Volume dell'ambiente, m^3 ;
- N Concentrazione spaziale dei quanta, $quanta/m^3$;
- I Numero iniziale di infetti;
- q Produzione oraria dei quanta, $quanta/h$;
- Q Portata di aria di ventilazione, m^3/h ;
- t Tempo conteggiato a partire dall'occupazione dell'edificio da parte dei soggetti.

Relazione di Walls – Riley in condizioni non stazionarie

Se gli effetti della filtrazione e degli altri sistemi (lampade U.V., mascherine) sono non trascurabili rispetto alla ventilazione allora si può sostituire Q nell'equazione precedente come somma del numero di ricambi orari e dei numeri equivalenti di ricambi per effetto dei meccanismi di riduzione, come si è visto con il metodo di **Fisk-Nazaroff**.

Supponendo una concentrazione spaziale dei quanta pari a 0, si ha, integrando:

$$\int_0^N \frac{dN}{Iq - NQ} = \frac{1}{V} \int_0^t dt$$

Assumendo costanti il numero di ricambi orari, la generazione oraria dei quanti e il numero di infetti, allora si ha:

$$N = \frac{Iq}{Q} \left[1 - e^{-\frac{Qt}{V}} \right]$$

ove Q/V è il numero di ricambi di aria esterna.

La concentrazione media dei quanta/ m^3 nel periodo di tempo fra 0 e t è data dalla relazione:

$$\bar{N} = \frac{1}{t} \int_0^t N dt = \frac{Iq}{Q} \left[1 - \frac{V}{Qt} \left(1 - e^{-\frac{Qt}{V}} \right) \right]$$

Relazione di Walls – Riley in condizioni non stazionarie

Sostituendo nell'equazione dell'esponente di **Poisson**:

$$\bar{\mu} = pt\bar{N} = \frac{Iqpt}{Q} \left[1 - \frac{V}{Qt} \left(1 - e^{-\frac{Qt}{V}} \right) \right]$$

Pertanto, l'equazione di **Walls-Riley** in condizioni non stazionarie diviene:

$$P = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q} \left[1 - \frac{V}{Qt} \left(1 - e^{-\frac{Qt}{V}} \right) \right]}$$

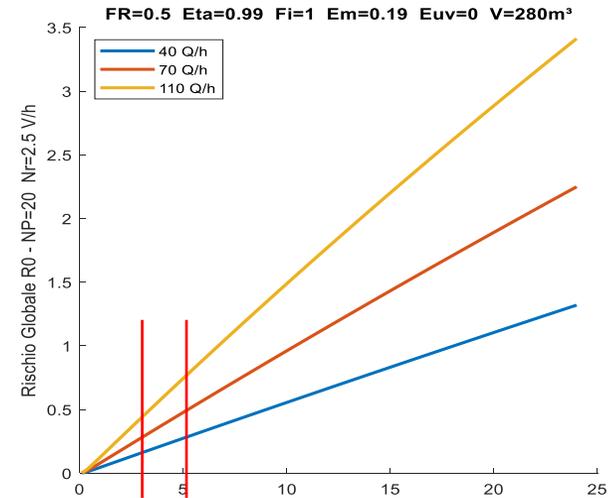
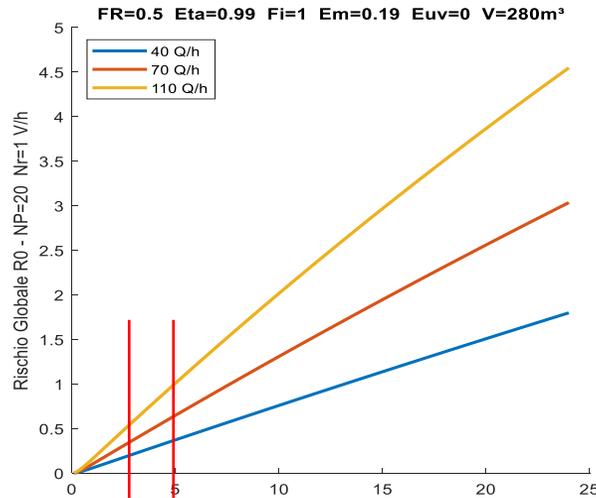
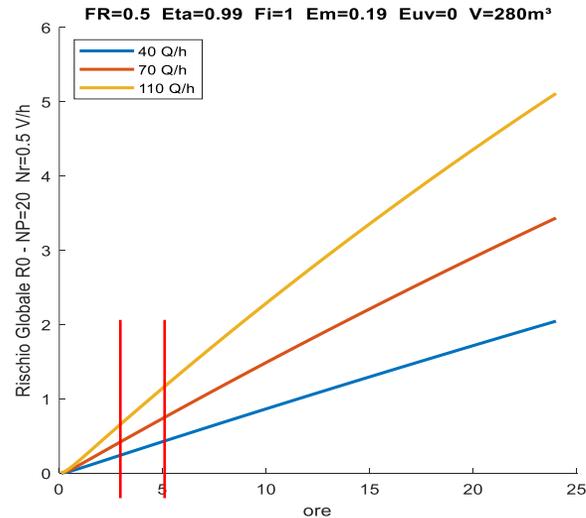
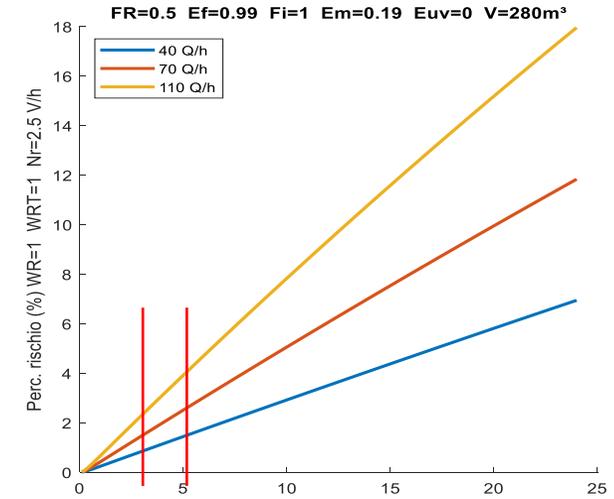
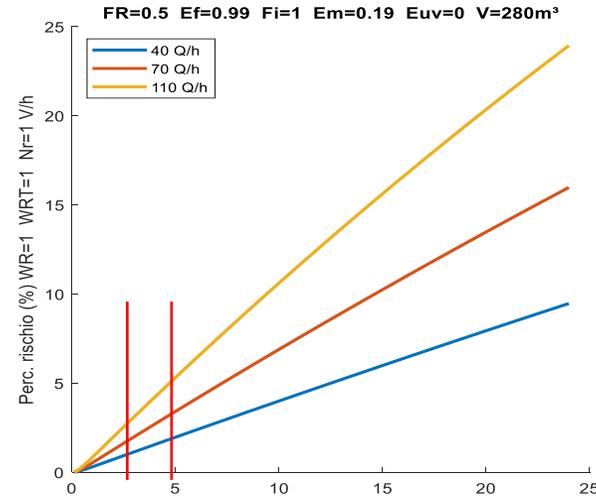
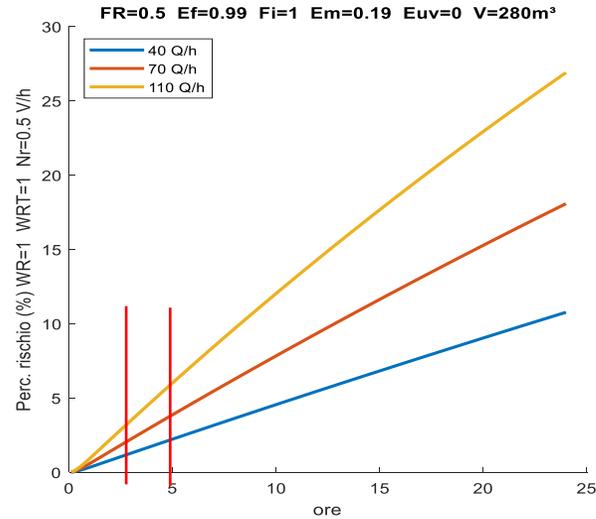
Se il numero di ricambi orari cambia durante l'esposizione individuale al patogeno allora $\frac{Qt}{V}$ è sufficientemente grande e quindi l'equazione precedente si riduce all'equazione in regime stazionario già vista in precedenza:

$$P = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q}}$$

Per brevi intervalli di scarsa ventilazione degli edifici con valore piccolo di $\frac{Qt}{V}$ allora l'equazione precedente può sovrastimare la **probabilità di infezione, P**, o sottostimare la produzione oraria individuale de quanta.

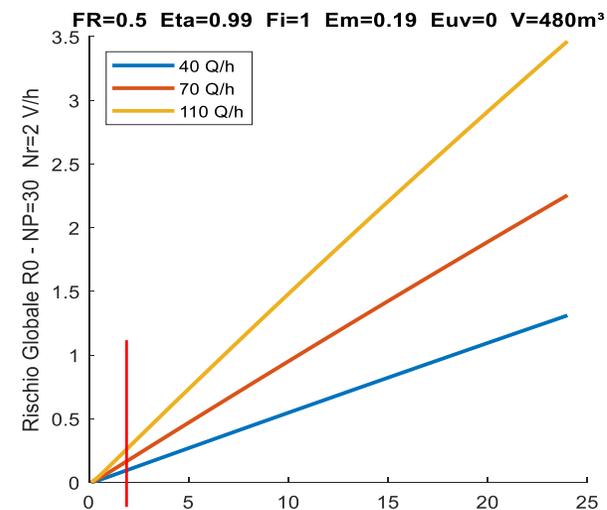
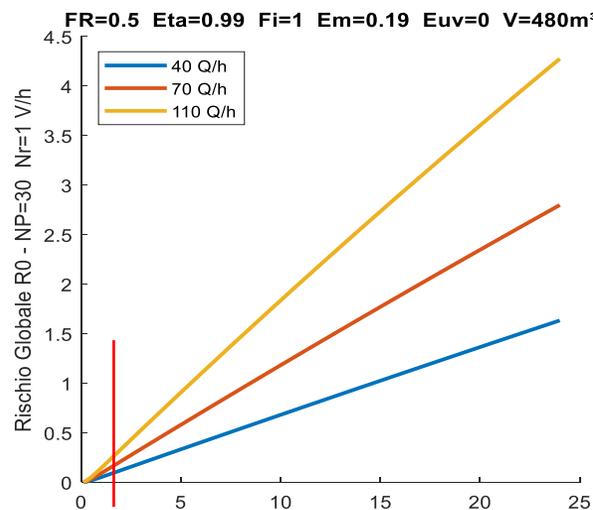
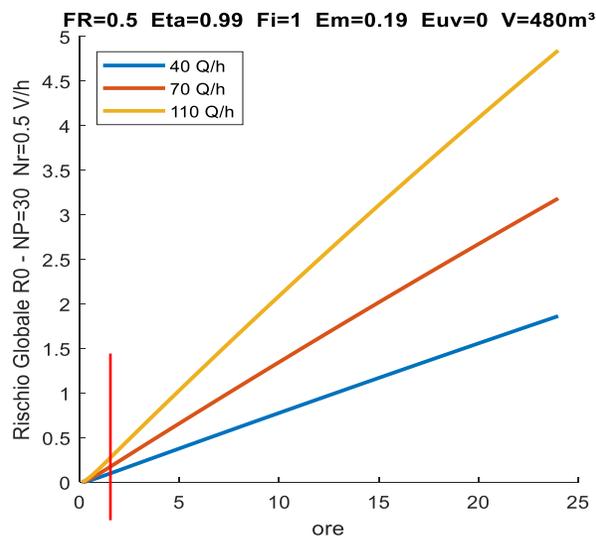
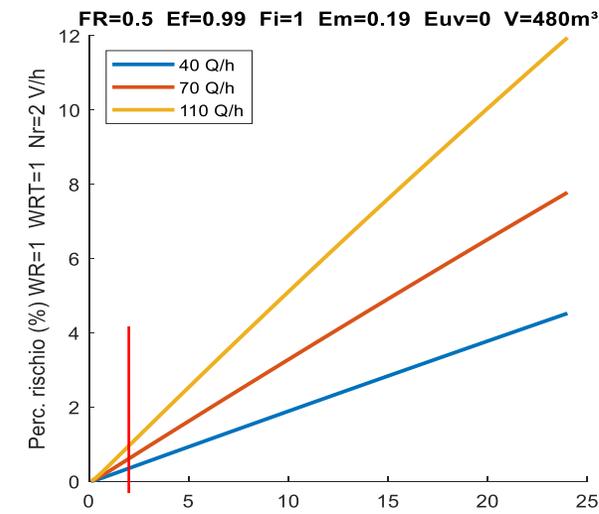
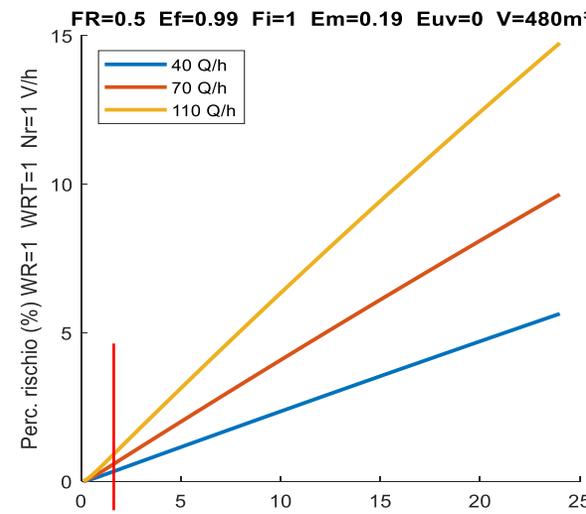
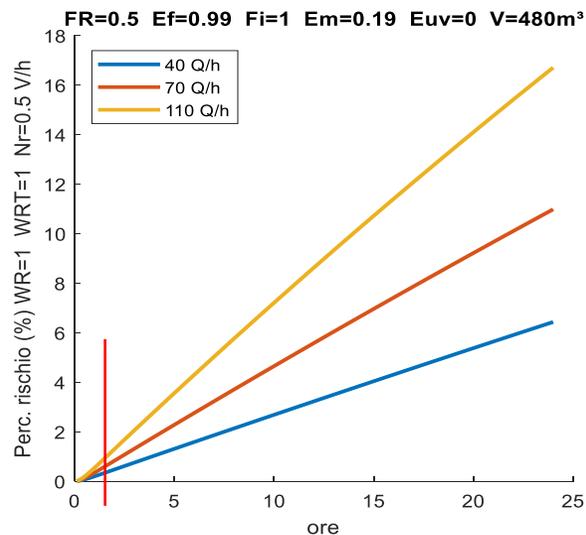
Relazione di Walls – Riley in condizioni non stazionarie - Aula

Aula elementari da 280 m³ con filtri ad alta efficienza e mascherine protettive



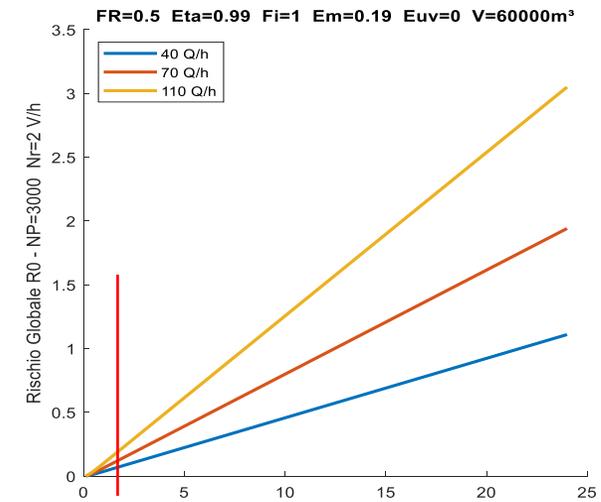
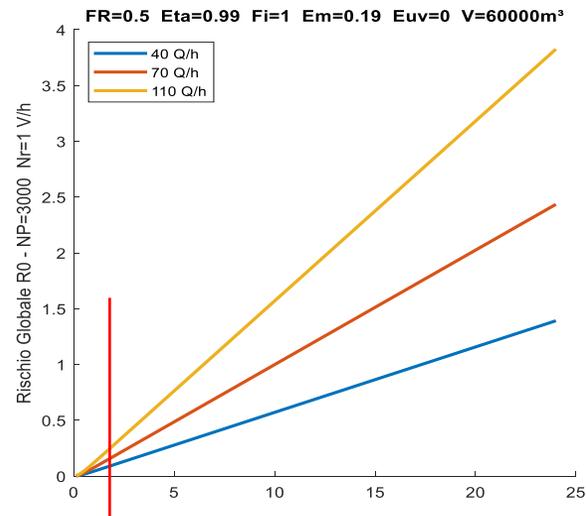
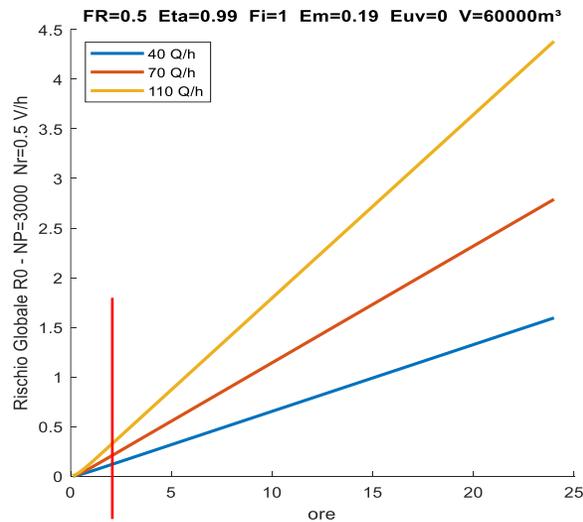
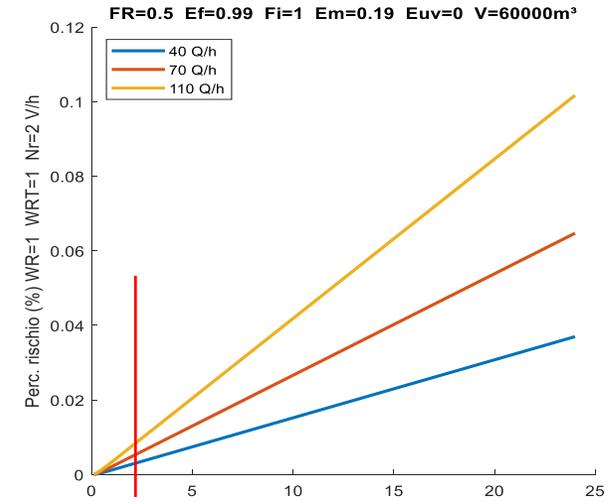
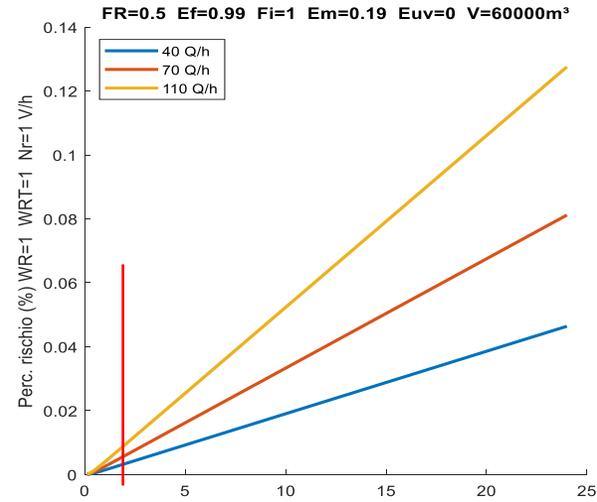
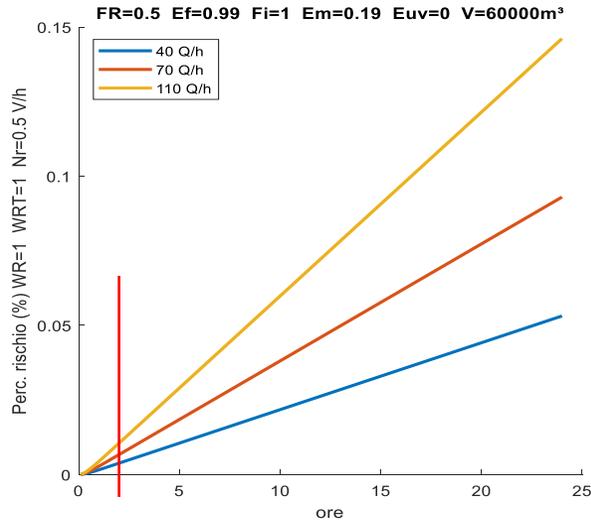
Relazione di Walls – Riley in condizioni non stazionarie - Negozio

Negoziato da **480** m² con filtri ad alta efficienza e mascherine



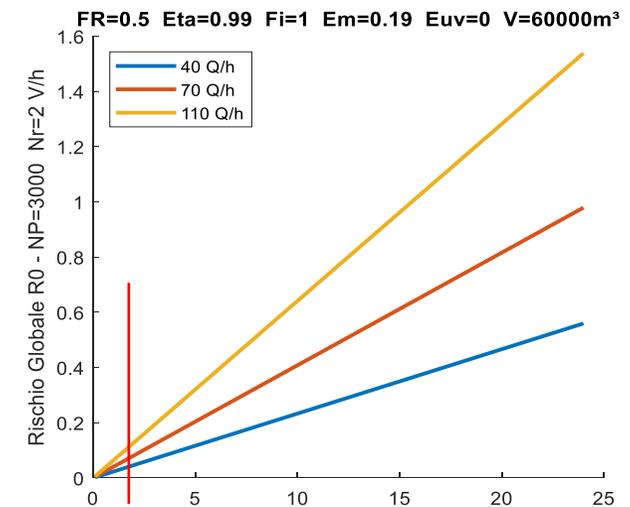
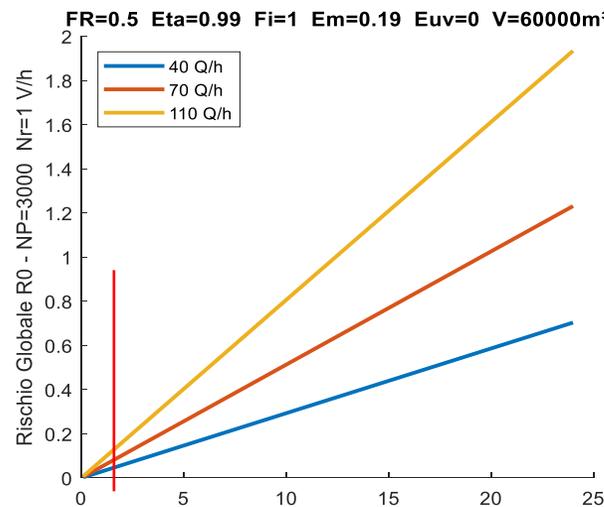
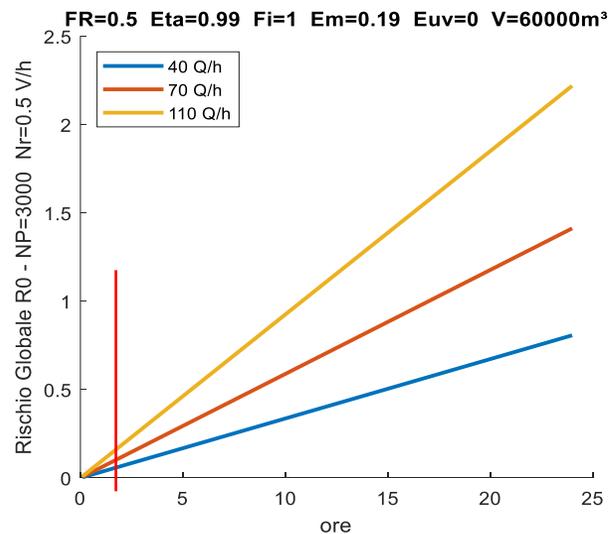
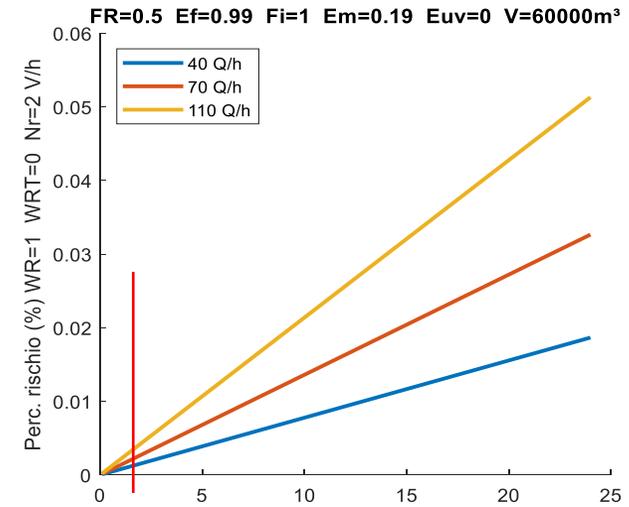
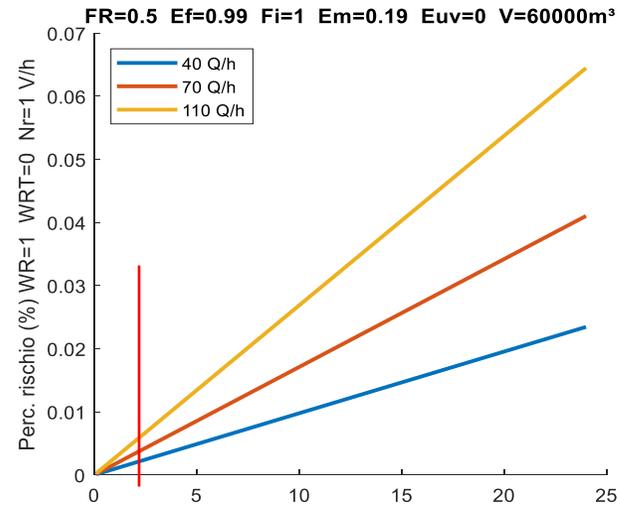
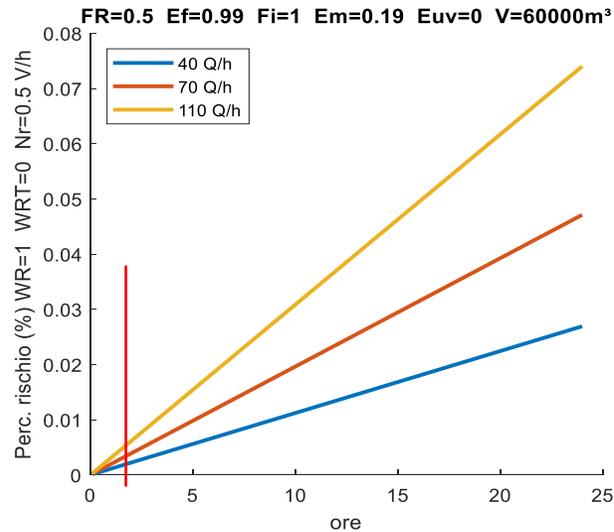
Relazione di Walls – Riley in condizioni non stazionarie - Ipermercato

Ipermercato da **60.000** m³ con filtri e mascherine



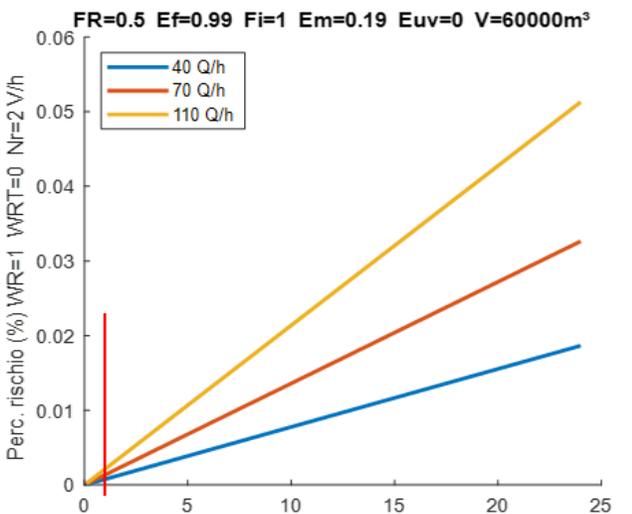
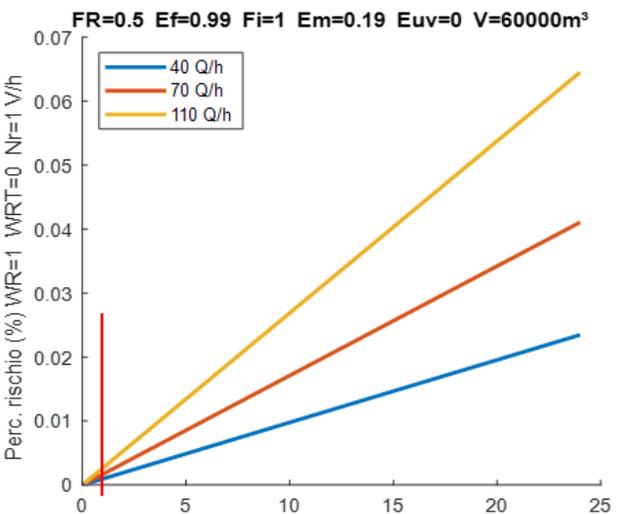
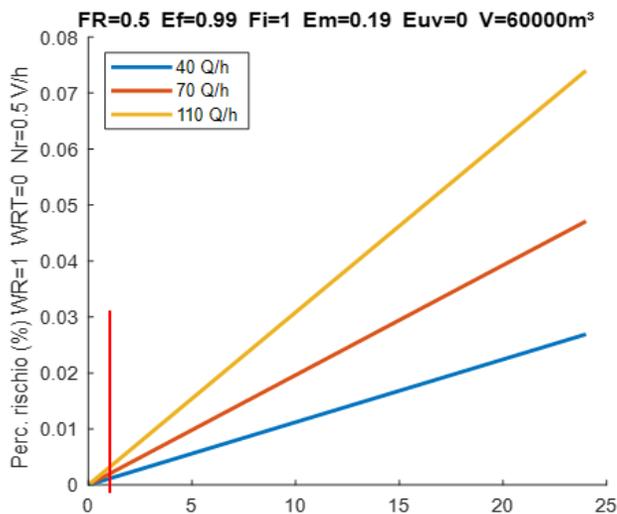
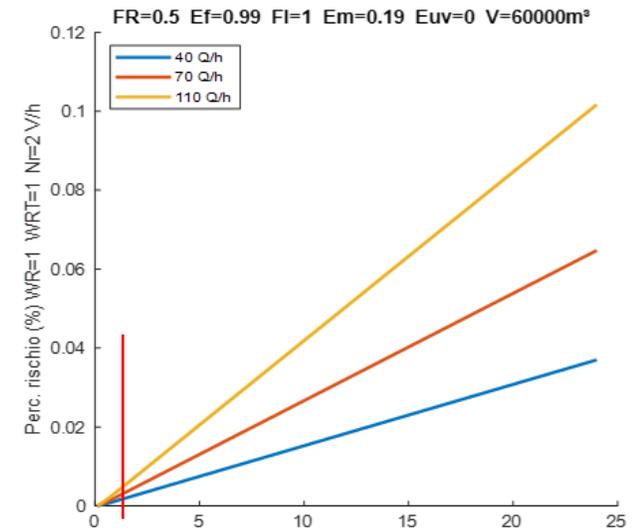
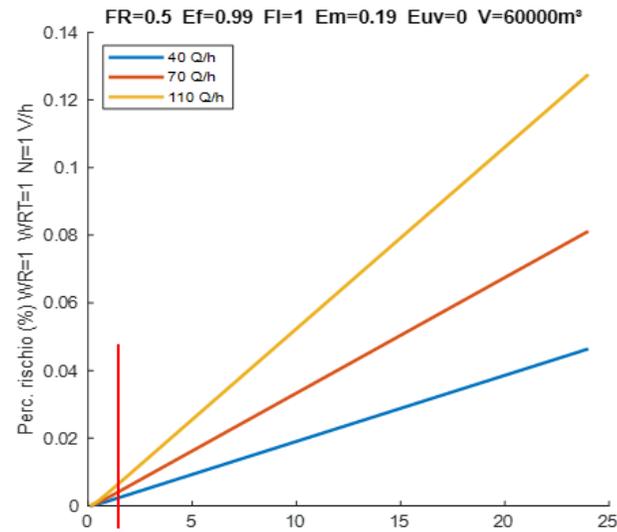
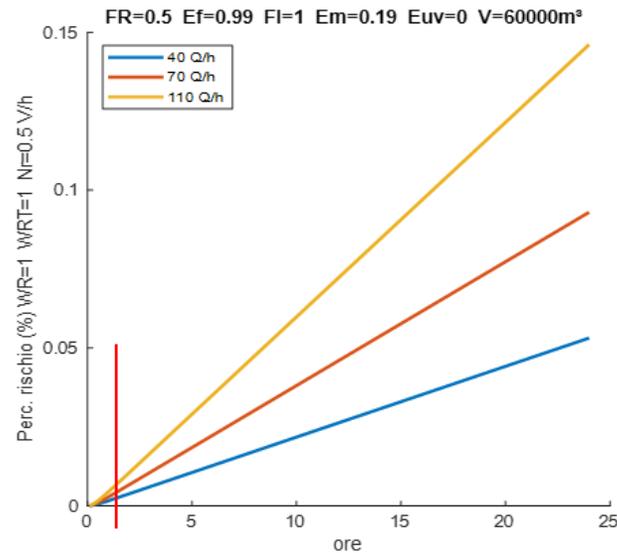
Relazione di Walls – Riley in condizioni non stazionarie - Ipermercato

Confronto con il caso di Walls-Riley in condizioni stazionarie per lo stesso ipermercato.



Relazione di Walls – Riley in condizioni non stazionarie - Ipermercato

Il confronto fra le condizioni stazionarie e in condizioni non stazionarie conferma che le ipotesi di regime stazionario tendono a **sottostimare la probabilità di contagio**.



LA VENTILAZIONE IN PRESENZA DI CONTAGIO

RELAZIONE GAMMAITONI NUCCI

Laura Gammaitoni and Maria Clara Nucci
University of Perugia, Perugia, Italy

We evaluated the efficacy of recommended tuberculosis (TB) infection control measures by using a deterministic mathematical model for airborne contagion. We examined the percentage of purified protein derivative conversions under various exposure conditions, environmental control strategies, and respiratory protective devices. We conclude that environmental control cannot eliminate the risk for TB transmission during high-risk procedures; respiratory protective devices, and particularly high-efficiency particulate air masks, may provide nearly complete protection if used with air filtration or ultraviolet irradiation. Nevertheless, the efficiency of these control measures decreases as the infectivity of the source case increases. Therefore, administrative control measures (e.g., indentifying and isolating patients with infectious TB) are the most effective because they substantially reduce the rate of infection.

After decades of steady decline and a subsequent relaxation of infection control practices in health-care facilities, the number of tuberculosis (TB) cases has been increasing dramatically in the United States (1) and Western Europe (2) since 1985; the increase is due to human immunodeficiency virus (HIV) infection, immigration, poverty, homelessness, and drug addiction.

Epidemiologic studies have shown that primary pulmonary TB is caused by inhaling the tubercle bacillus in a droplet nucleus form (3). Airborne contagion is crucial in the indoor

Nosocomial TB transmission is also associated with cough-generating procedures (6), bronchoscopy (7), endotracheal intubation and suctioning (8), open abscess irrigation (9), and autopsy (10). Workers involved in such procedures are at high and increasing risk for TB (11) because of the resurgence of the disease, the emergence of multidrug-resistant (MDR) strains causing outbreaks in hospitals among patients and health care workers, and compromised TB control due to decreased funding of health-care agencies responsible for TB control.

Relazione di Gammaitoni - Nucci

Nel **1997** è stata pubblicata un'importante studio per il calcolo del rischio da contagio da *tubercolosi* dalle due ricercatrici italiane **Laura Gammaitoni** e **Maria Clara Nucci** dell'**Università di Perugia**.

In questo studio si calcola con maggior raffinatezza il **rischio di contagio** e i **quanta/h** prodotti. In particolare si fa l'ipotesi che i **quanta/h** possano variare secondo una media pesata col tempo.

Inoltre, questa relazione si presta ad essere utilizzata per valutare gli effetti dei **sistemi di protezione passivi** quali *filtri, lampade UV, deposizione dei droplet e dispositivi di protezione individuali, quali le mascherine*.

Se ne presenta una breve sintesi analitica.

Using a Mathematical Model to Evaluate the Efficacy of TB Control Measures

Laura Gammaitoni and Maria Clara Nucci
University of Perugia, Perugia, Italy

Relazione di Gammaitoni - Nucci

Si fanno alcune ipotesi di calcolo:

- I **quanta** di infezione sono aggiunti all'interno dell'ambiente da malati infetti;
- **Il periodo della malattia è maggiore del tempo di calcolo considerato;**
- Si immette **aria fresca non contagiata** dall'esterno;
- Che l'aria sia **uniformemente distribuita all'interno dell'ambiente;**
- Che il **numero di persone infettate è proporzionale al numero di persone suscettibili interne** e i quanta di infezione prodotti.

La proporzionalità fra il numero di **persone infettate** e il numero di **persone suscettibili**, **S**, di infezione moltiplicato per i **quanta** prodotti, **Q**, è pari al rapporto fra l'attività di ventilazione polmonare, **p**, e il volume dell'ambiente, **V**. Pertanto, si hanno le due equazioni differenziali:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{p}{V} QS$$

$$\frac{dQ}{dt} = -C_d Q + q_i \quad \text{per } t \geq 0$$

Le condizioni iniziali sono:

$$S(0) = S_0 > 0$$

$$Q(0) = Q_0 > 0$$

Relazione di Gammaitoni - Nucci

Le soluzioni delle due equazioni differenziali sono:

$$S(t, q, C_d) = S_0 e^{\left(\frac{pqI}{V} \frac{C_d t + e^{-C_d t} - 1}{C_d^2} \right)}$$

$$Q(t, q, C_d) = \left(Q_0 - \frac{q}{C_d} \right) e^{-C_d t} + \frac{q}{C_d}$$

ove C_d è il **fattore di contaminazione**, normalmente pari al numero di ricambi orari di aria fresca. Q_0 è il numero di quanta iniziali, se presenti.

La percentuale di **rischio di contagio** è dato dalla relazione:

$$P(t, q, C_d) = \left(1 - \frac{S(t, q, C_d)}{S_0} \right) \cdot 100 = \left(1 - e^{-\frac{pqI}{V} \frac{C_d t + e^{-C_d t} - 1}{C_d^2}} \right) \cdot 100$$

E il numero di **quanta/h** prodotti è dato da:

$$q = \frac{V}{p} \frac{C_d^2}{C_d t + e^{-C_d t} - 1} \log \frac{S_0}{S}$$

La relazione di **Gammaitoni-Nucci** considera la **concentrazione media pesata temporalmente nell'ambiente** invece di considerare che la concentrazione abbia raggiunto un valore stazionario.

Relazione di Gammaitoni – Nucci modificata fa Fisk e Nazaroff

In forma completa la relazione di **Gammaitoni – Nucci** (detta **variante a** in condizioni stazionarie) completa è:

$$P = \left(1 - e^{-\frac{pqI}{V} C_d t} \right) \cdot 100$$

ove il **fattore di disinfezione**, C_d , è dato dal **numero di ricambi orari di disinfezione corretto** di aria fresca nell'ambiente.

Si osservi che l'equazione suddetta presuppone ancora:

- che ci sia una distribuzione dell'aria pienamente miscelata;
- che i soggetti **suscettibili** (cioè *sani ma in grado di infettarsi*) sia presente fin dall'inizio del calcolo, cioè per $t=0$;
- che la **concentrazione dei quanta** nell'ambiente **sia nulla al momento iniziale**, $t=0$.

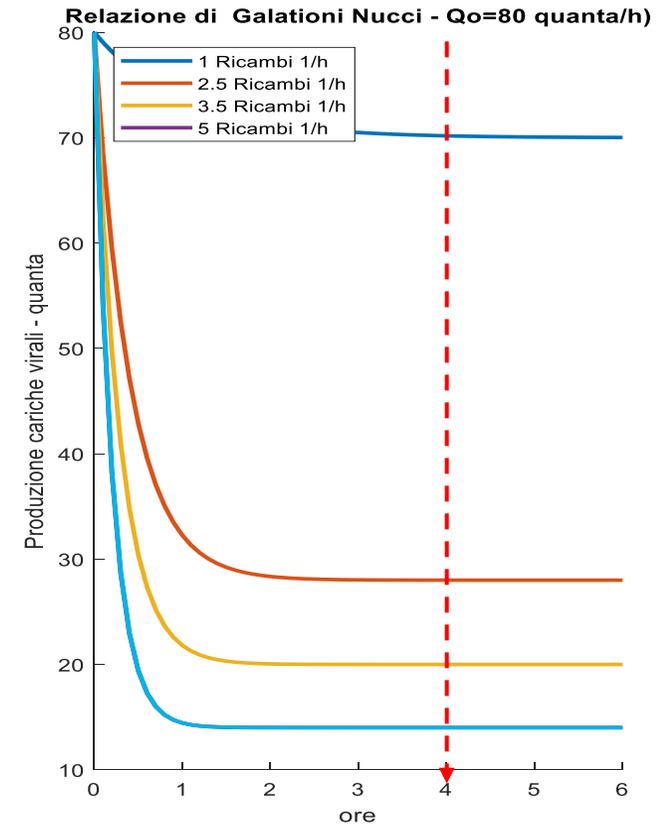
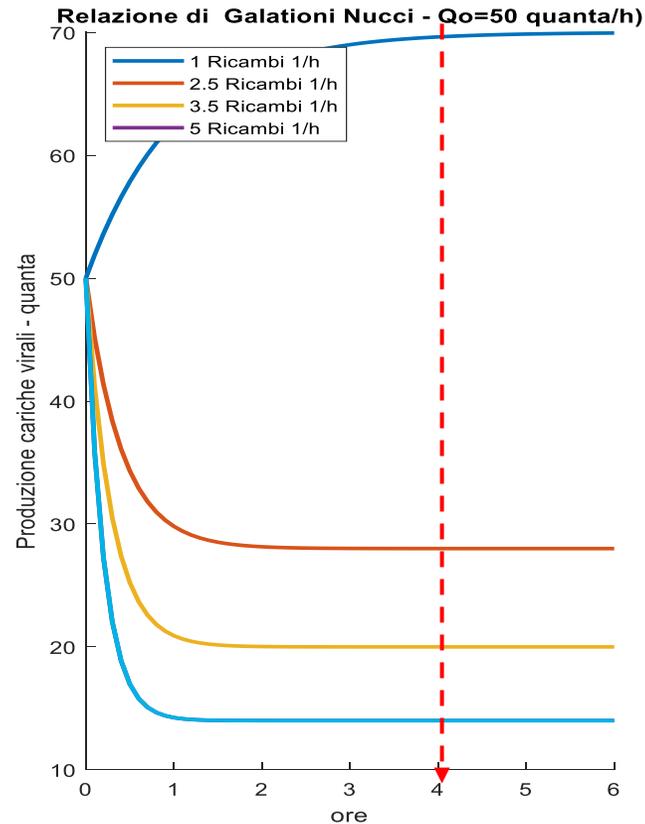
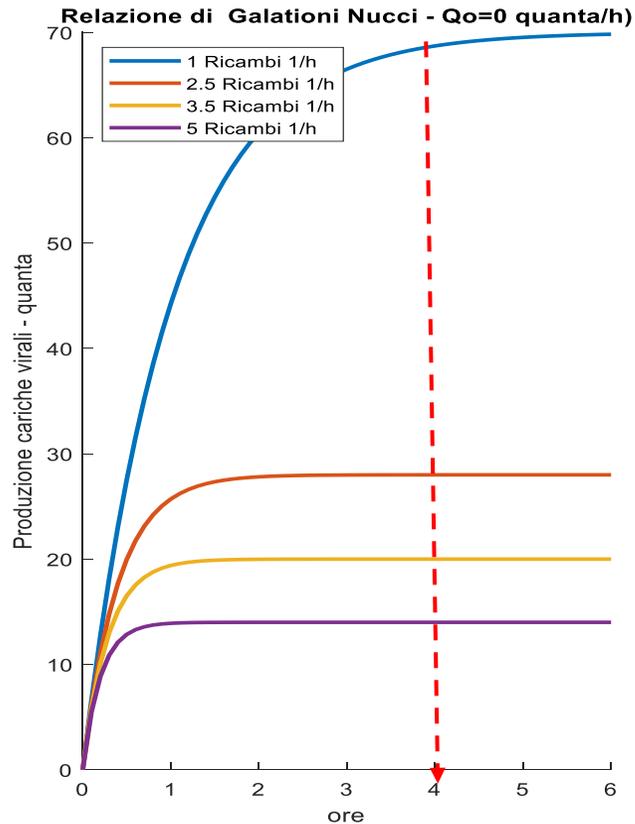
Se la concentrazione dei **quanta/h** non è inizialmente nulla allora occorre considerare una variante all'equazione di **Gammaitoni-Nucci** detta **variante b**, mostrata nella pagine seguente.

Relazione di Gammaitoni – Nucci modificata da Buonanno

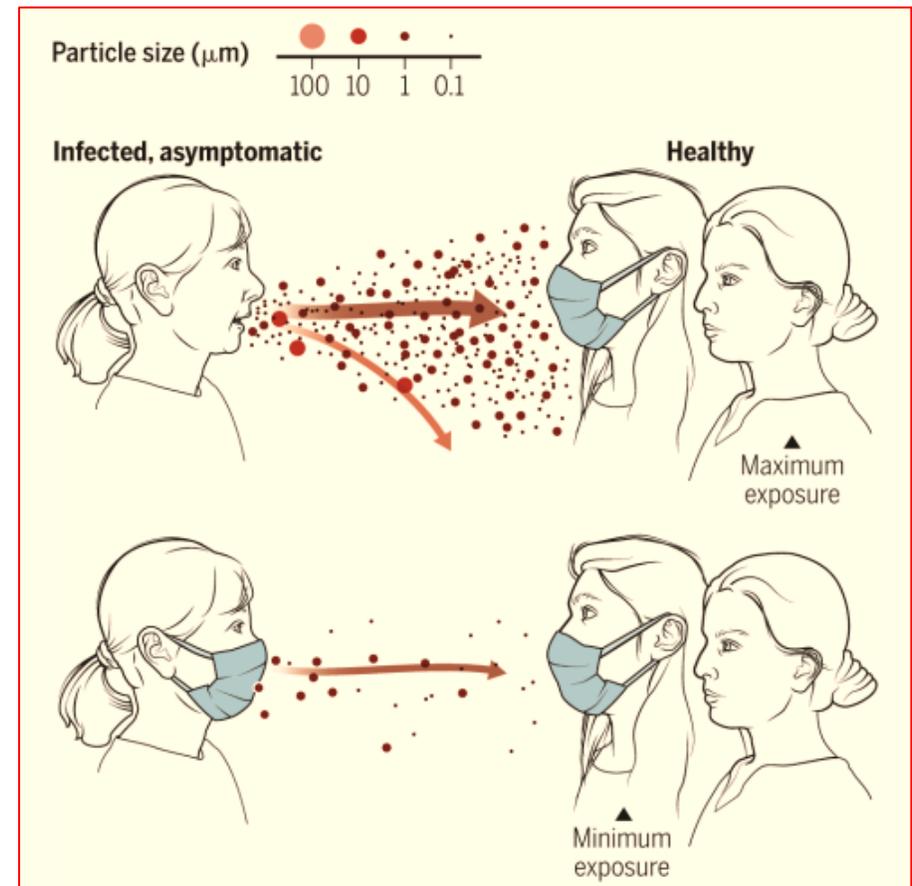
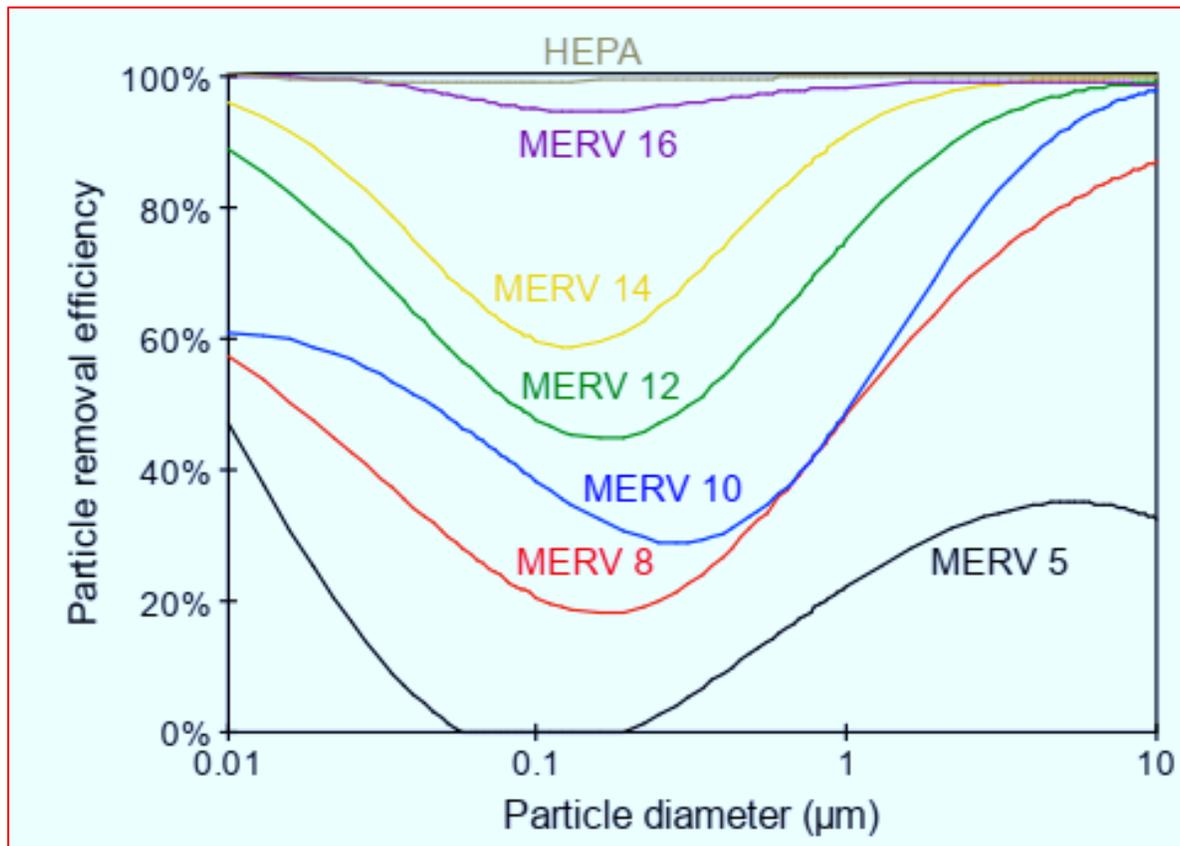
La produzione di **cariche virali (quanta/h)**, funzione del numero di infetti, **I**, dell numero di ricambi orari, **n**, e al numero di cariche iniziali, **N₀**, è la seguente:

$$N_R = \frac{q \cdot I}{n} + \left(N_0 - \frac{q \cdot I}{n} \right) \cdot e^{-n \cdot t}$$

Seguono esempi per vari valori di **N₀** e per prodotti **q= 70 quanta/h** prodotti da **I=1** infetto



MODIFICHE DI FISK E NAZAROFF PER LE PROTEZIONI PASSIVE DEGLI IMPIANTI



Azioni passive di alcuni componenti di impianto

La **ventilazione meccanica** ha lo scopo di immettere aria fresca incontaminata dall'esterno negli ambienti interni in modo da diluire i patogeni e ridurre la probabilità di contagio.

Nella versione più semplificata la ventilazione meccanica è costituita da canali di presa dell'aria esterne, una UTA ed un ventilatore di mandata con la rete di distribuzione canalizzata.

Unitamente all'aria immessa si provvede a riprendere l'aria interna e espellerla verso l'esterno, sempre mediante rete di canali di ripresa.

L'UTA o la VMC possono poi avere un recuperatore di calore e possono provvedere a ricircolare parte dell'aria di ripresa, a seconda dei bilanci energetici da conseguire.

E' possibile inserire nelle UTA o nella VMC alcuni componenti passivi:

- **Filtri sull'aria esterna;**
- **Filtri sull'aria di ricircolo;**
- **Lampade U.V. all'interno dell'UTA o nei canali di mandata.**

A questi elementi si aggiunge un effetto benefico ai fini della riduzione dell'**aerosol** disperso nell'aria, cioè il **deposito** di materiale organico (**droplet**) sul terreno o sulle superfici orizzontali eventualmente presenti per effetto della gravità e la **riduzione di vitalità** del virus.

Infine, si ha un elemento passivo di protezione individuale molto efficace quanto aleatorio: la **mascherina** facciale.

Per tenere conto di tutti questi elementi **Fisk e Nazaroff** propongono le relazioni modificate sia per **Walls-Riley** che per **Gammaitoni-Nucci**.

Relazione di Walls- Riley modificata da Fisk e Nazaroff

Partendo dalla relazione di **Walls – Riley** in condizioni stazionarie, e con analogo ragionamento che si farà per la relazione di **Gammaitoni – Nucci**, si può avere una relazione, modificata da **Fisk (2005) e Nazaroff (1998)**, che tenga conto anche delle protezioni passive:

$$P = \frac{C}{S} = \left(1 - e^{-\left(\frac{R_{masc} I_{qpt_{exp}}}{Q + \lambda_{UV} V + Q_r \eta_r} \right)} \right) 100 = \left(1 - e^{-\left(\frac{R_{masc} I_{qpt_{exp}}}{C_d \cdot V} \right)} \right) 100$$

ove:

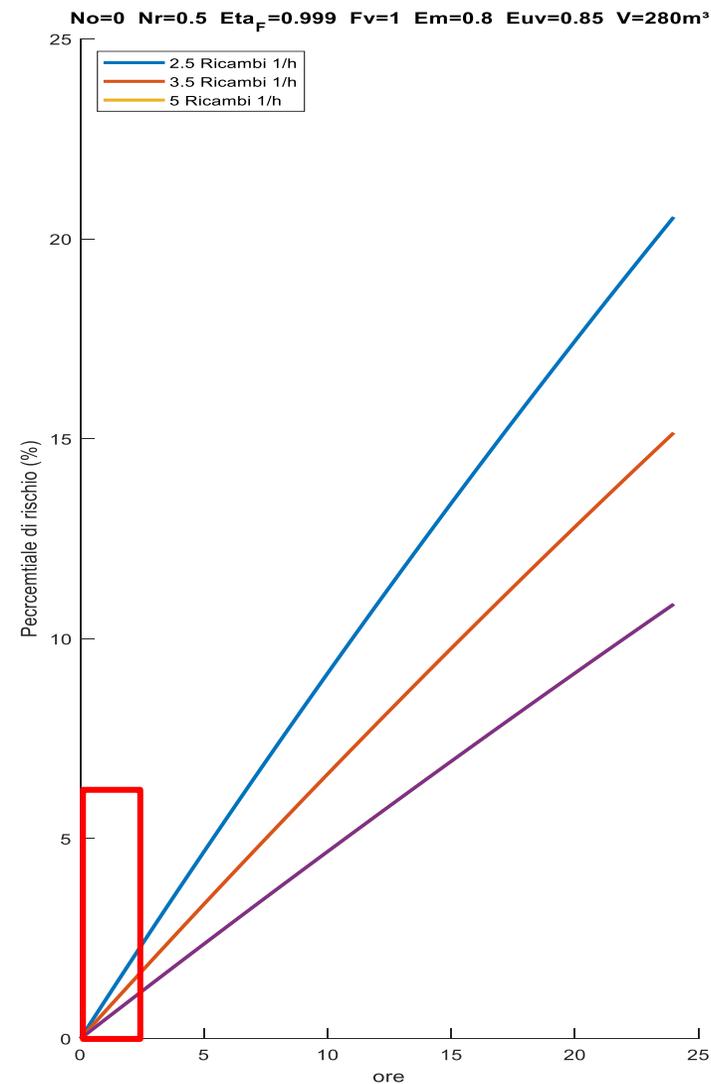
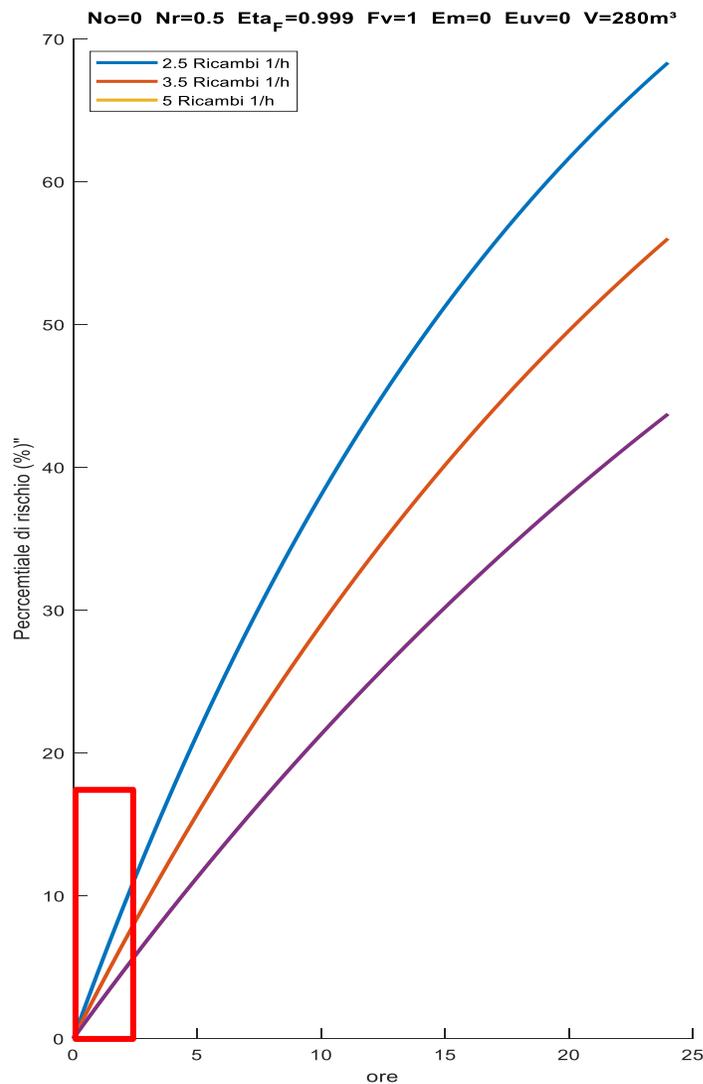
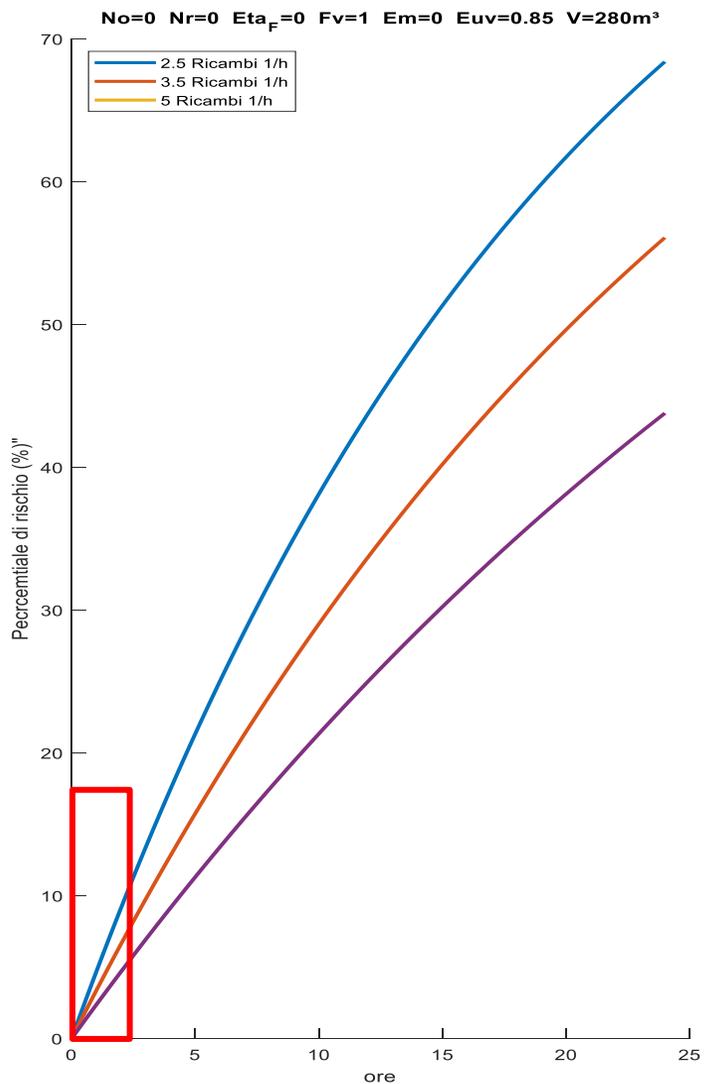
- C_d Numero di ricircolo d'aria di disinfezione corretto: $C_d = \lambda_{ventilazione} + \lambda_{filtrazione} \cdot \eta_{filtro} + \lambda_{UN} \cdot \eta_{UV} + \lambda_{deposito}$
- Q portata totale di ventilazione: $Q = N_r \cdot V$, m^3/h ;
- λ_{UV} frazione della portata d'aria che attraversa la lampada UV, $1/h$;
- V Volume dell'ambiente, m^3 ;
- Q_r portata d'aria di ricircolo, m^3/h ;
- η_r efficienza di eliminazione della lampada UV;
- R_{masc} fattore correttivo della mascherina dato da X efficienza mascherina, Y perdite facciali:

$$R_{masc} = \left[100 - \left(X - \frac{X \cdot Y}{100} \right) \right] \%$$

I termini correttivi saranno illustrati per la relazione di **Gammaitoni - Nucci**.

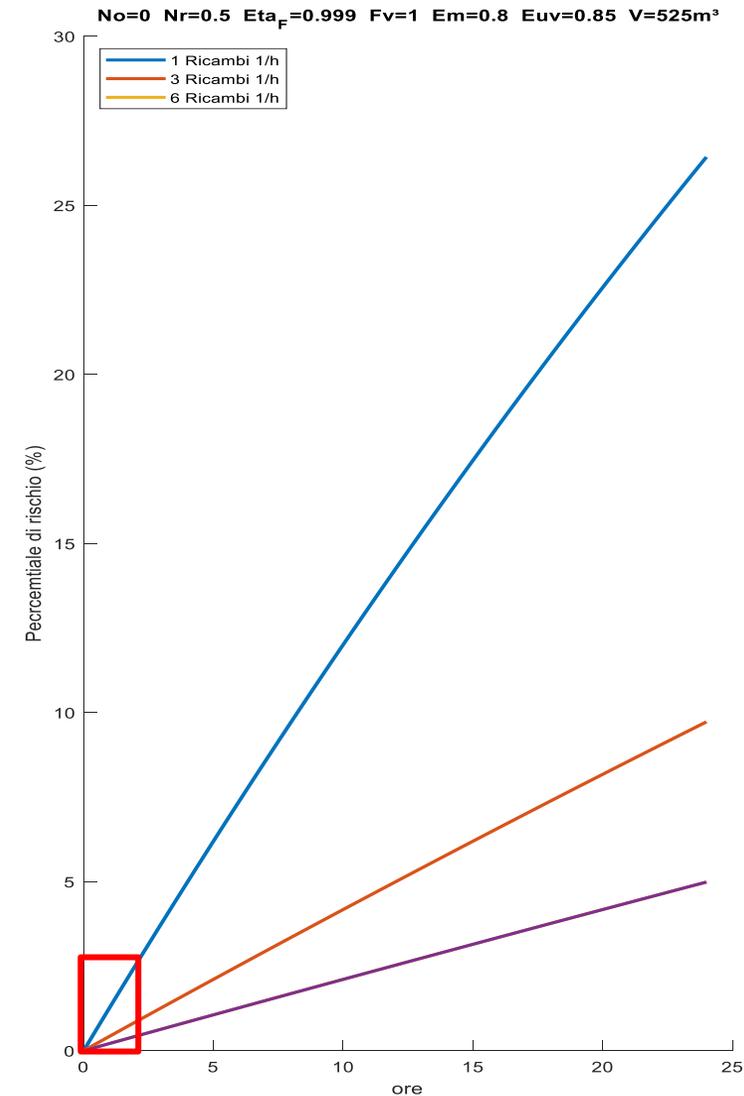
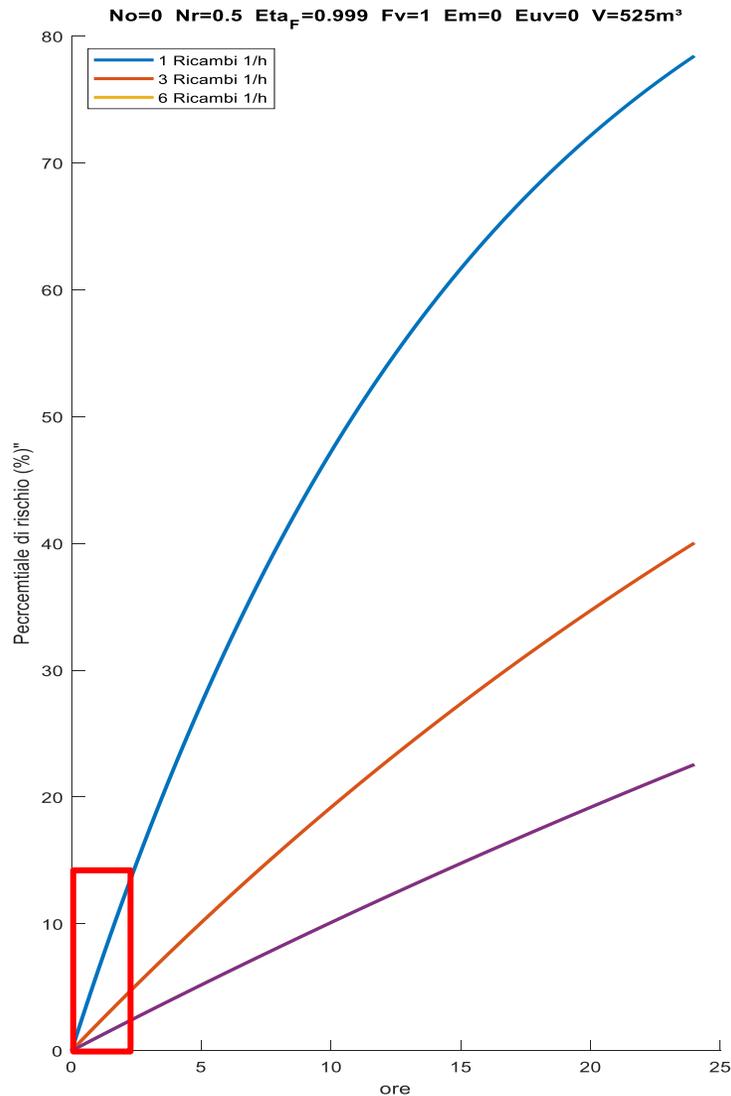
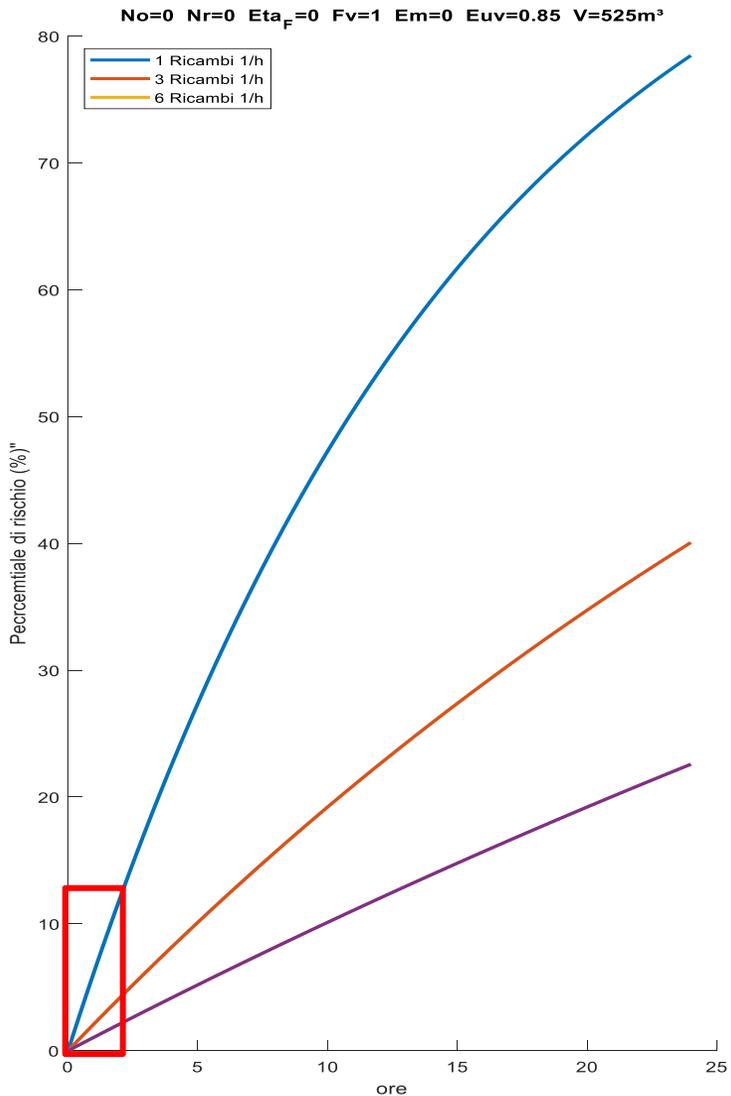
Relazione di Walls- Riley modificata da Fisk e Nazaroff

Calcolo del rischio di contagio per un'aula scolastica da 280 m³ per varie portate di ricambio d'aria, senza e con ricircolo, senza e con filtri, senza e con mascherine, con e senza lampade UV.



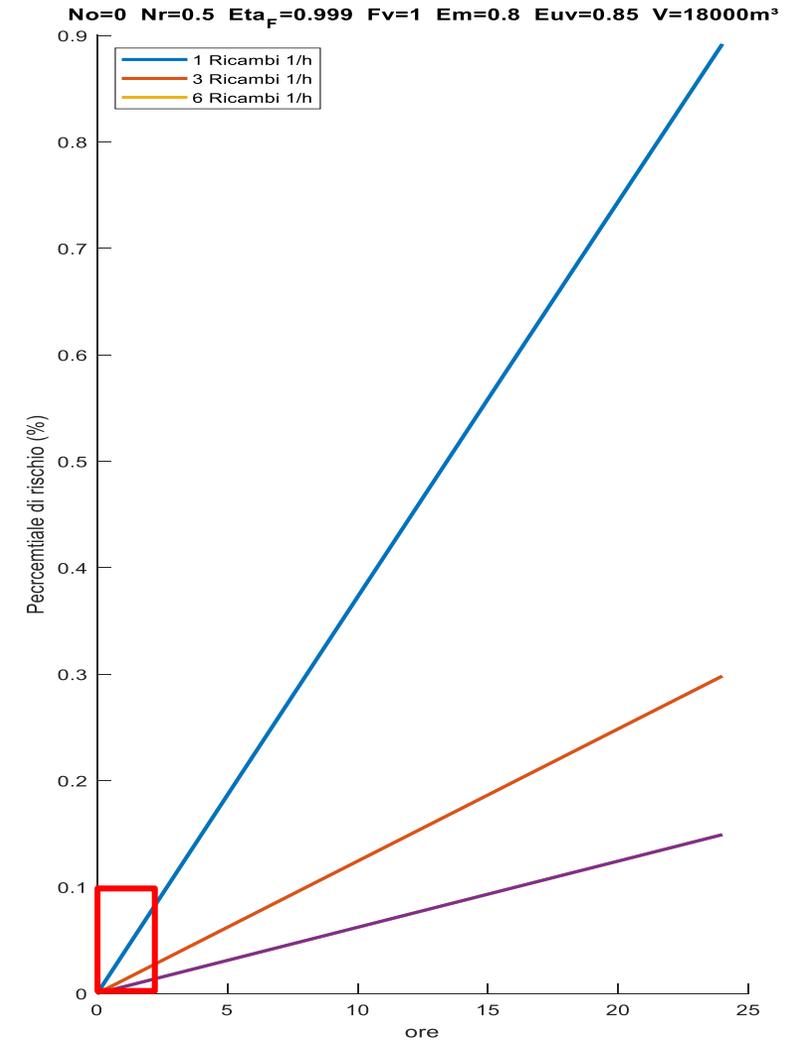
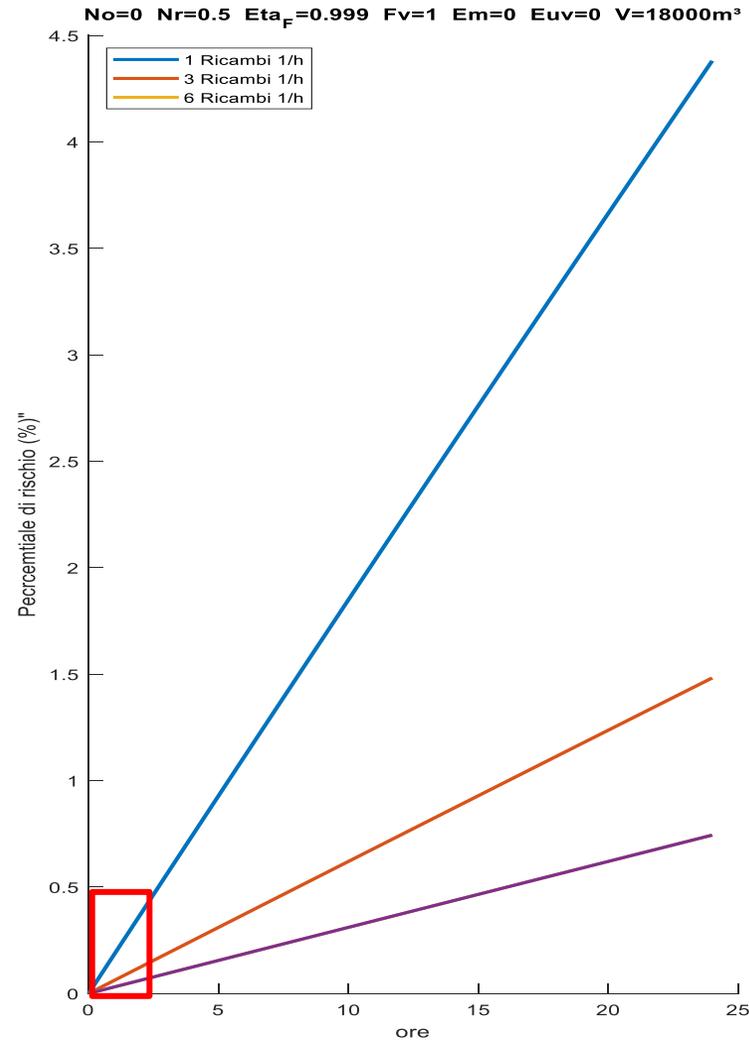
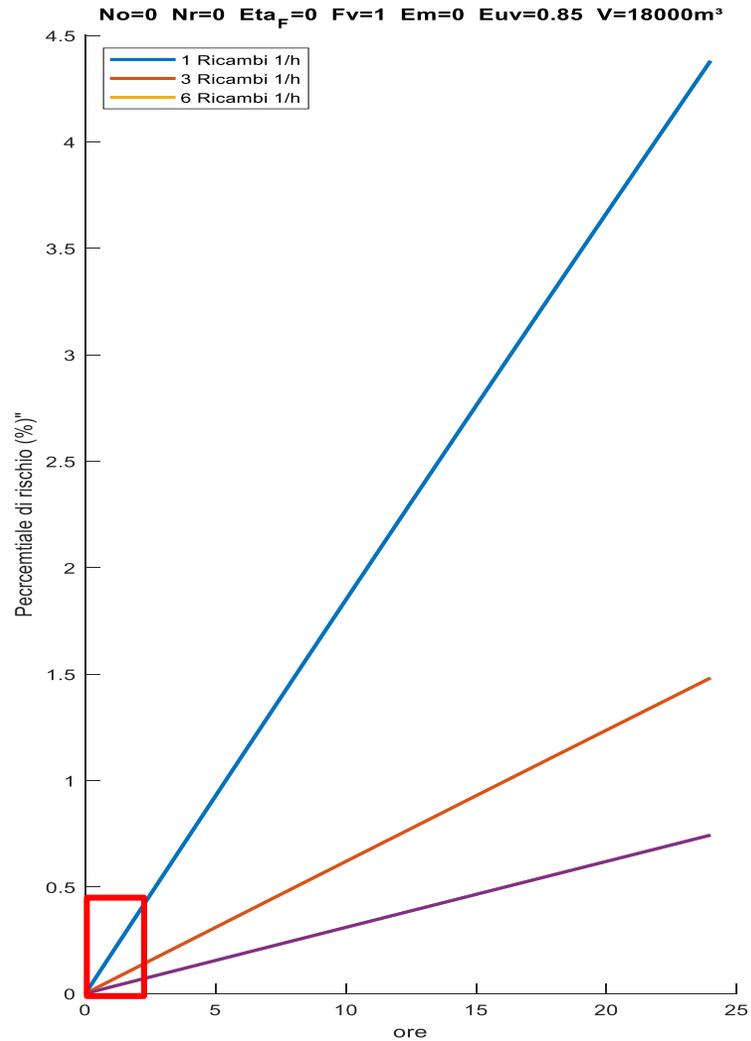
Relazione di Walls- Riley modificata da Fisk e Nazaroff

Calcolo del rischio di contagio per un negozio da 525 m³ per varie portate di ricambio d'aria, senza e con ricircolo, senza e con filtri, senza e con mascherine, con e senza lampade UV.



Relazione di Walls- Riley modificata da Fisk e Nazaroff

Calcolo del rischio di contagio per un **supermercato da 18.000 m³** con varie portate di ricambio d'aria, senza e con ricircolo, senza e con filtri, senza e con mascherine, con e senza lampade UV.



Relazione di Gammaitoni – Nucci modificata fa Fisk e Nazaroff

La relazione di **Gammaitoni – Nucci**, nella **variante b** in condizioni transitorie e presenza di **n** infetti iniziali, modificata da **Fisk (2005)** e **Nazaroff (1998)** è:

$$P = \left(1 - e^{-\frac{pqI}{V} \left(C_d t + e^{-C_d t} - 1 - \left(\frac{C_d n_0}{q} \right) e^{-C_d t} + \frac{C_d n_0}{q} \right)} \right) * 100$$

Questa relazione considera le protezioni passive:

- Per ventilazione;
- Per filtrazione;
- Per uso di lampade UV;
- Per deposizione dei droplet;

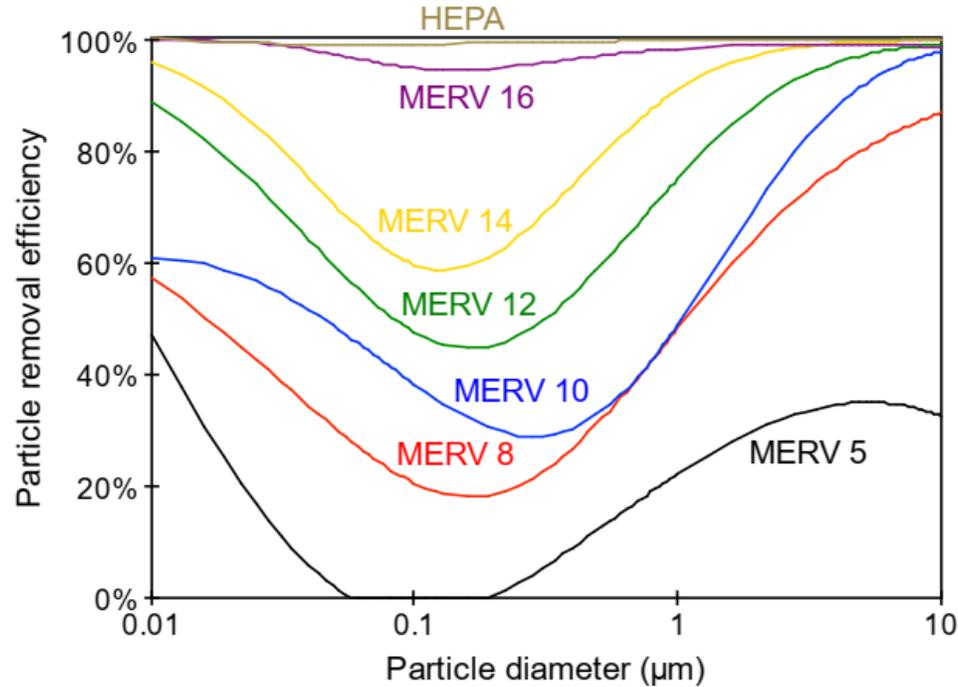
Il fattore di rimozione complessivo è dato dalla relazione:

$$C_{d\text{ove}} = \lambda_{\text{ventilazione}} + \lambda_{\text{filtrazione}} \cdot \eta_{\text{filtro}} + \lambda_{\text{UN}} \cdot \eta_{\text{UV}} + \lambda_{\text{deposito}} \quad \lambda_{\text{filtrazione}} = f_{\text{HVAC}} \frac{Q_{\text{filtro}} \eta_{\text{filtro}}}{V} = \lambda_{\text{filtrazione}} \eta_{\text{filtro}}$$

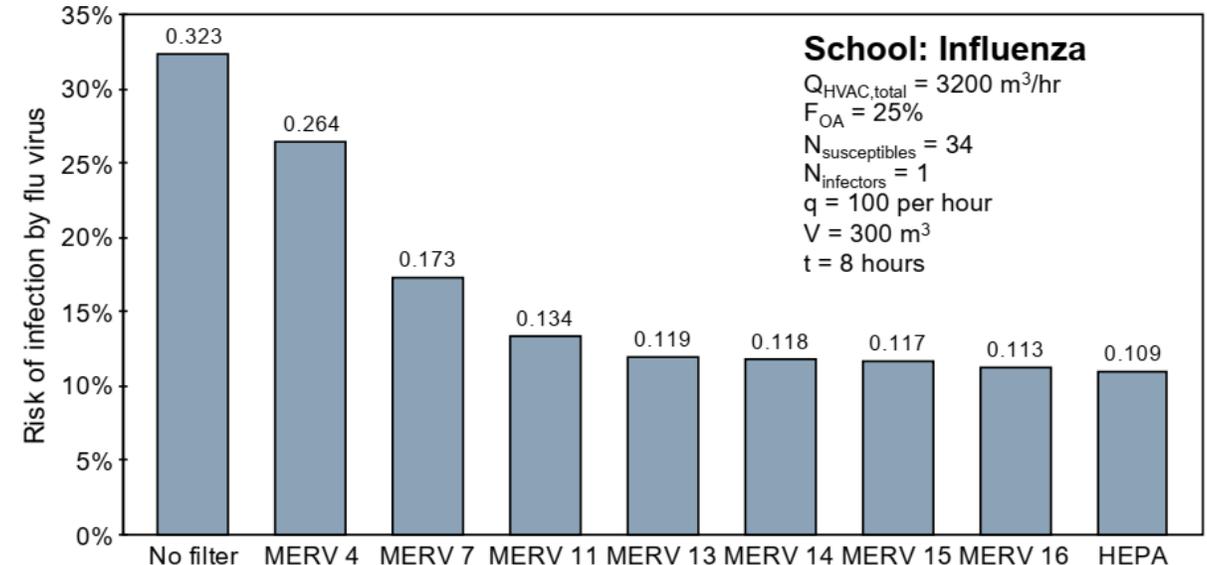
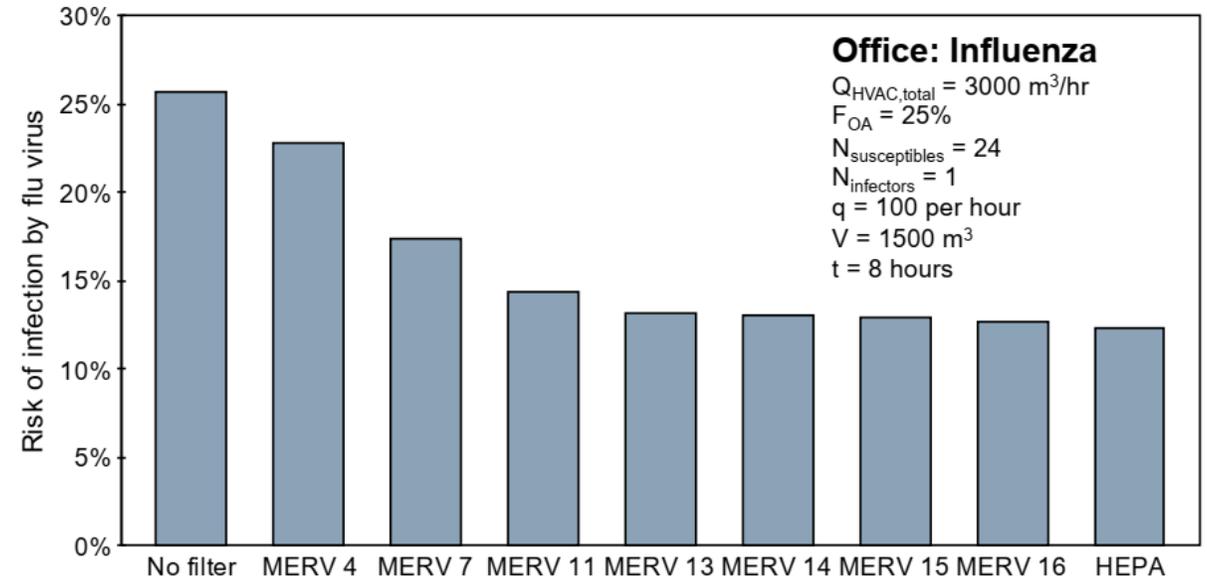
- f_{HVAC} frazione di tempo con impianto HVAC in funzione;
- Q_{filtro} Portata d'aria attraverso il filtro, m^3/h ;
- η_{filtro} efficienza di rimozione del filtro;
- $\lambda_{\text{filtrazione}}$ numero di ricambi d'aria equivalenti, $1/\text{h}$;
- $\lambda_{\text{deposito}}$ numero di ricambi d'aria equivalenti per deposito, $1/\text{h}$;

Relazione di Gammaitoni – Nucci modificata fa Fisk e Nazaroff

Hecher e Hofacre, 2008, hanno valutato l'effetto dei filtri HEPA e propongono il seguente abaco:



MERV	Droplet nuclei removal efficiency (η_{filter})	Assumed filter removal rate ($\lambda_{\text{recirculated}} \times \eta_{\text{filter}}$, 1/hr)
4	11%	0.17
7	44%	0.67
11	72%	1.09
13	87%	1.32
14	89%	1.35
15	90%	1.37
16	95%	1.45
HEPA	99.9%	1.52



Relazione di Gammaitoni – Effetti delle mascherine di protezione

Le **mascherine di protezione**, dalle chirurgiche in su, consentono di ridurre il rischio di contagio, come è possibile osservare nella figura seguente. **Gammaitoni-Nucci** indicano come tener conto del **fattore correttivo** per il flusso di ventilazione, ***p***.

Se la mascherina ha un'efficienza di filtrazione **X%** e una fuoriuscita facciale di **Y%** allora l'efficienza di filtrazione operativa della maschera è:

$$Z = X - \frac{X \cdot Y}{100}$$

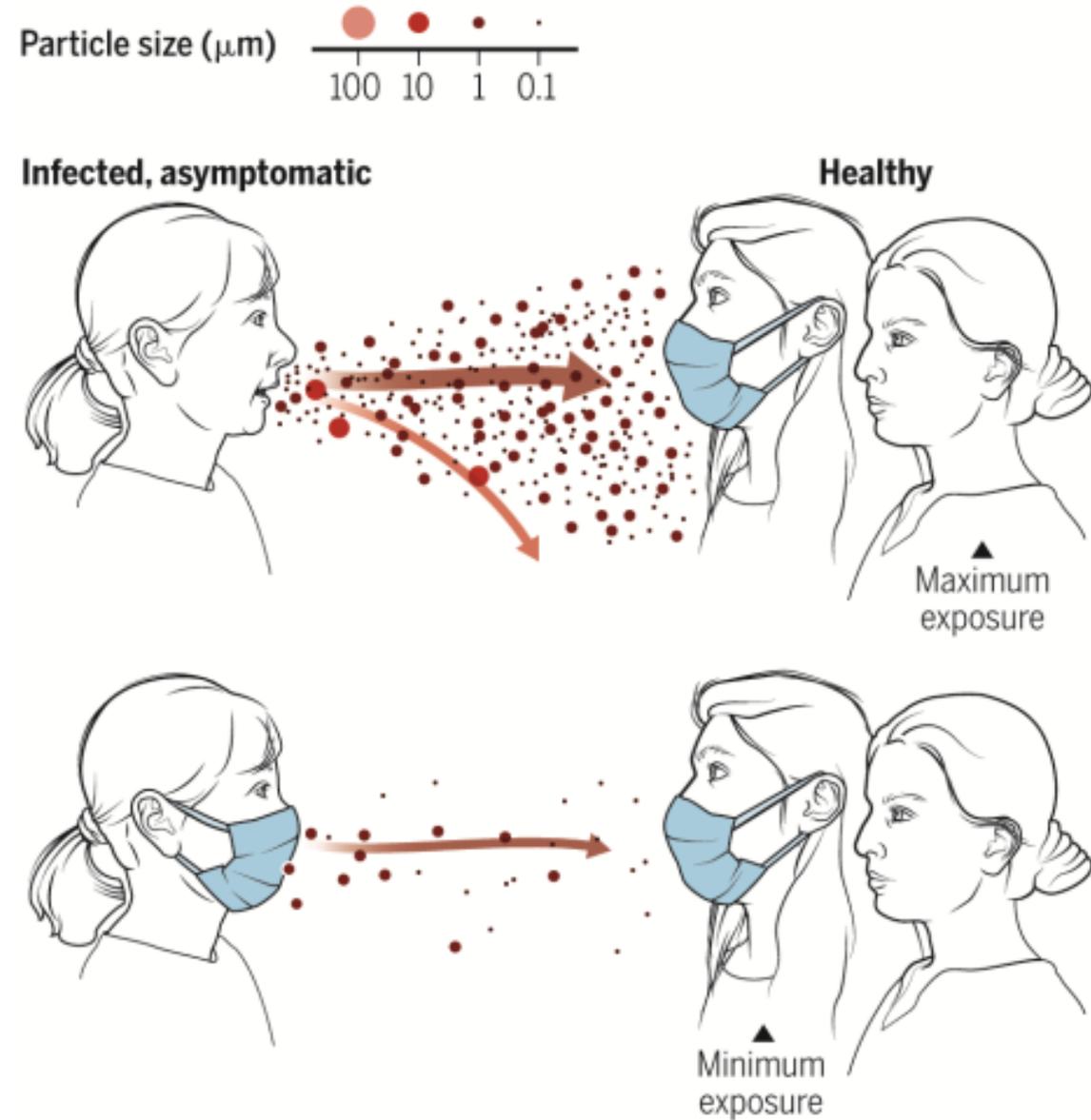
e il **fattore correttivo** per ***p*** vale:

$$(100 - Z)\%$$

Ad esempio, se $X=90\%$, $y=10\%$ risulta $Z=85.5\%$ e il **fattore correttivo, *f***, vale:

$$f_{masc} = (100 - 85.5) = 14.5\%$$

Per una mascherina chirurgica si assume, di solito, $f_{masc} = 60\%$.



Relazione di Gammaitoni – Effetti delle mascherine di protezione

Pertanto la relazione completa nella forma **b)** di **Gammaitoni – Nucci** per l'utilizzo della **mascherina** diviene:

$$P = \left(1 - e^{-\frac{f_{masc} p \cdot q I}{V} \left(C_d t + e^{-C_d t} - 1 - \left(\frac{C_d n_0}{q} \right) e^{-C_d t} + \frac{C_d n_0}{q} \right)} \right) \cdot 100$$

Questa relazione considera anche le protezioni passive:

- Per ventilazione;
- Per filtrazione;
- Per uso di lampade UV;
- Per deposizione dei droplet;
- Per l'utilizzo di mascherina.

Il fattore di rimozione complessivo è sempre dato dalla relazione:

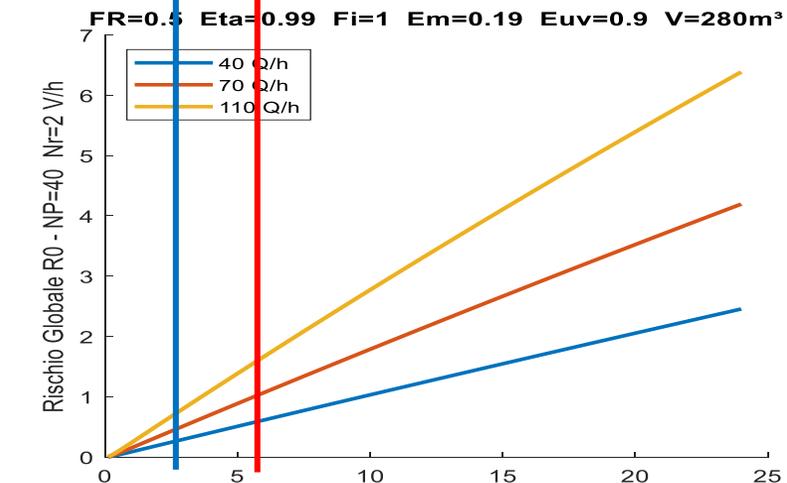
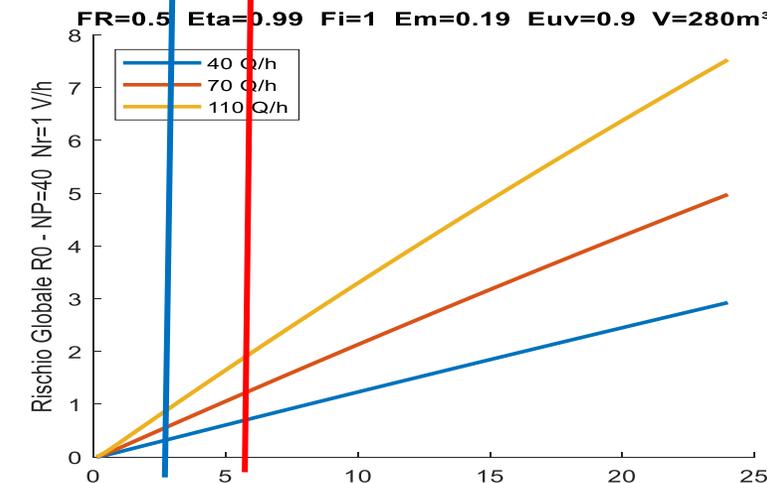
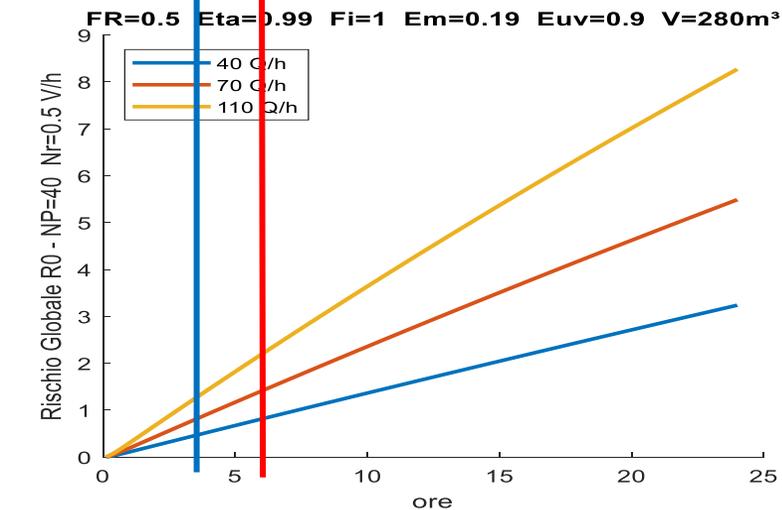
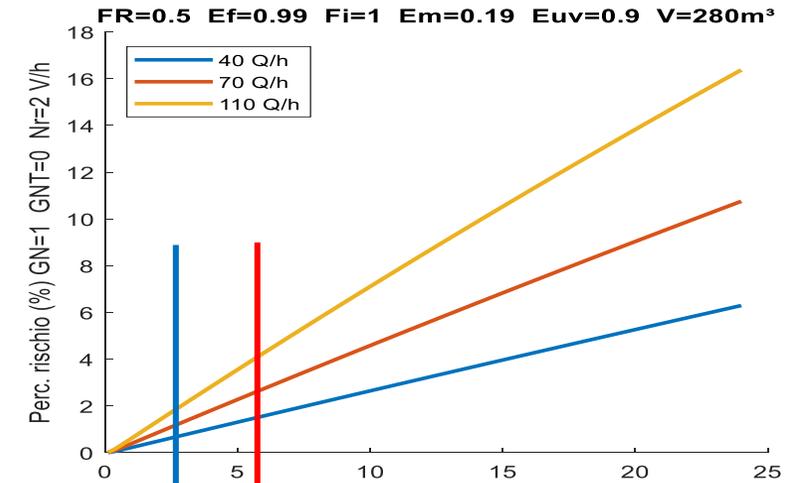
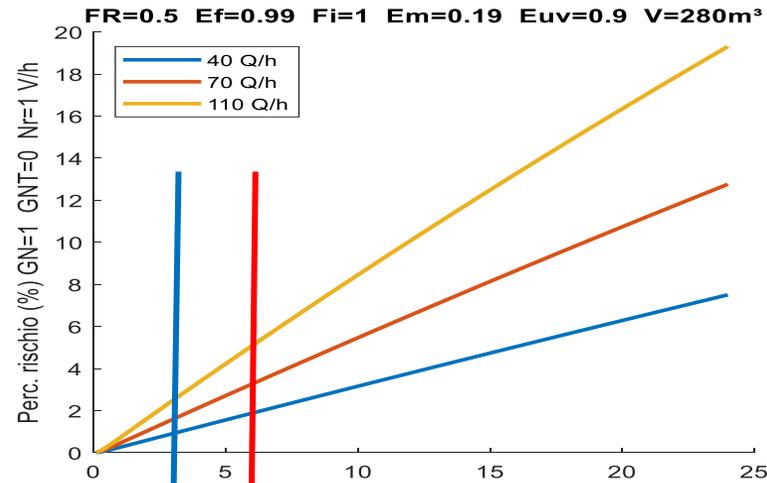
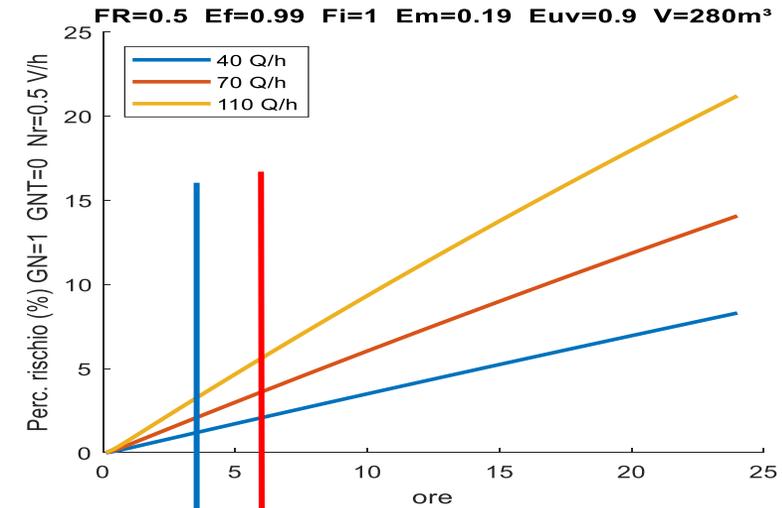
$$C_d = \lambda_{ventilazione} + \lambda_{filtrazione} \cdot \eta_{filtro} + \lambda_{UN} \cdot \eta_{UV} + \lambda_{deposito}$$

$$f_{masc} = \left[100 - \left(X - \frac{X \cdot Y}{100} \right) \right] \%$$

con lo stesso simbolismo visto prima.

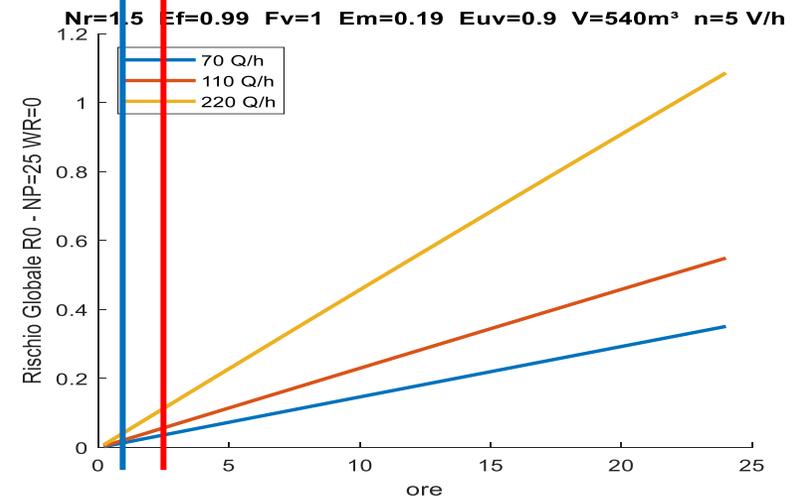
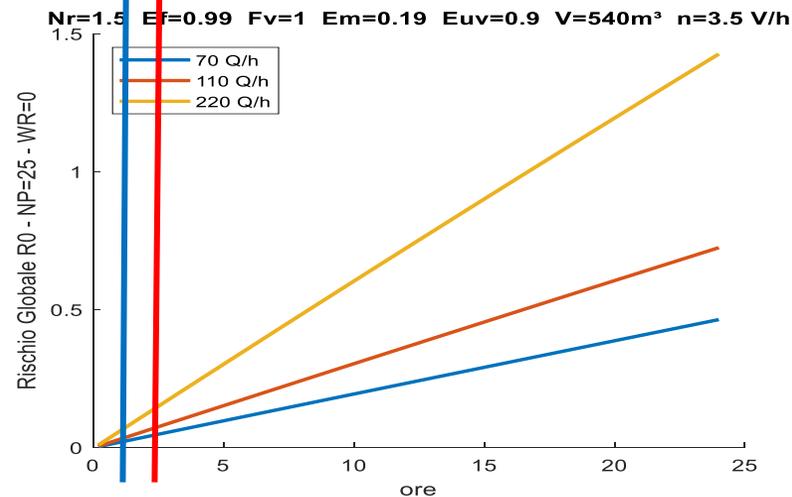
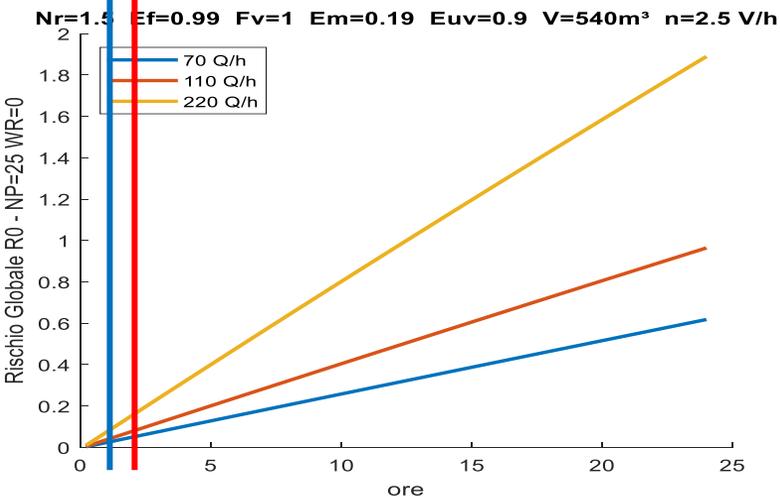
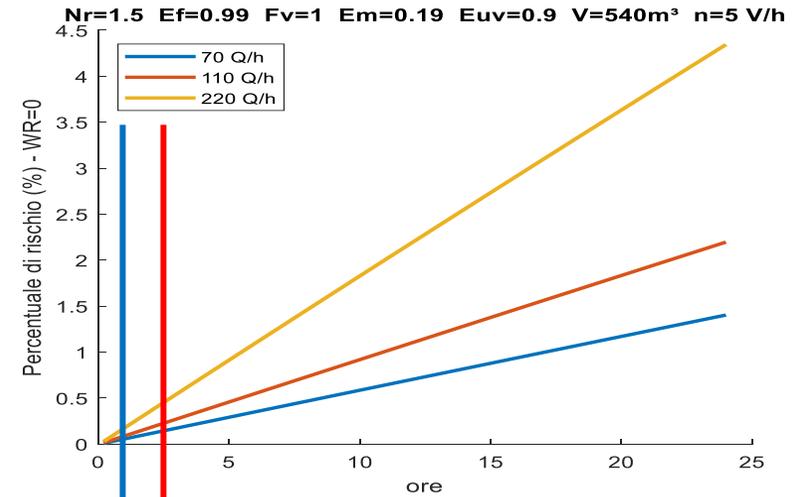
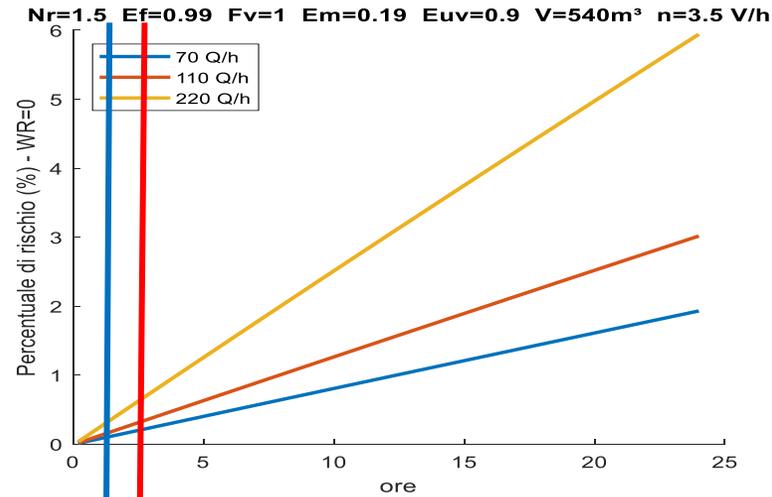
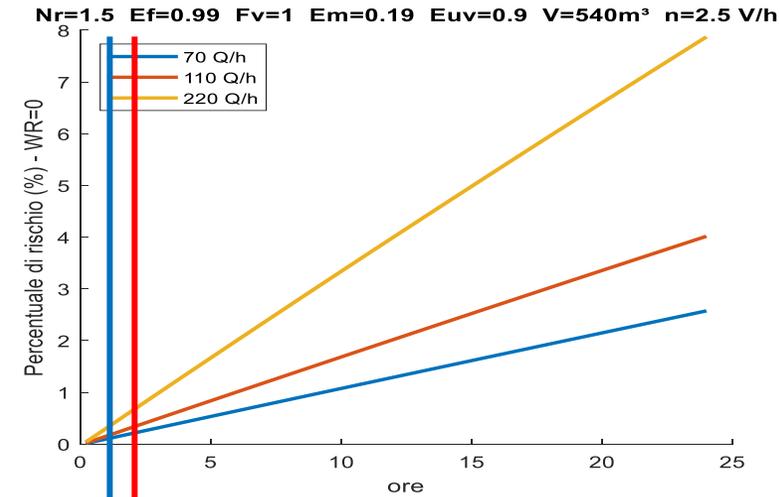
Relazione di Gammaitoni – Nucci modificata fa Fisk e Nazaroff

Calcolo del rischio di contagio individuale (P) per un'aula scolastica da 280 m³ con ricircolo, filtri, mascherine e lampade UV. Si ha anche il **Rischio Globale**, $R_0=(N_{p-1}) * P$ per N_p persone.



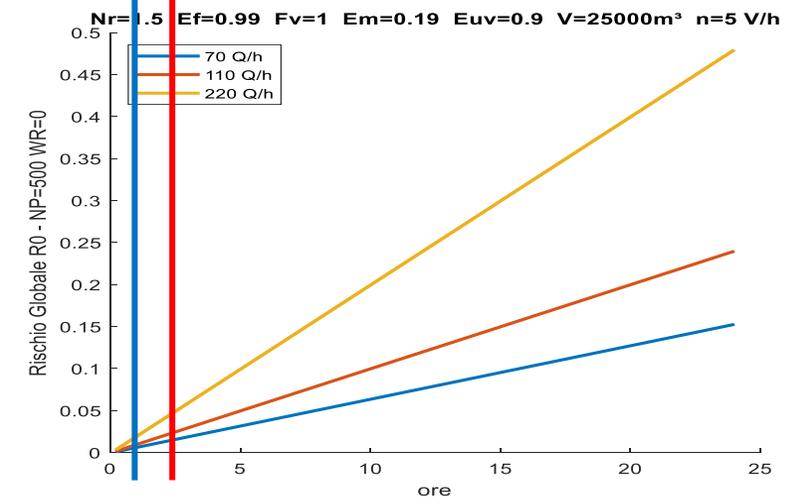
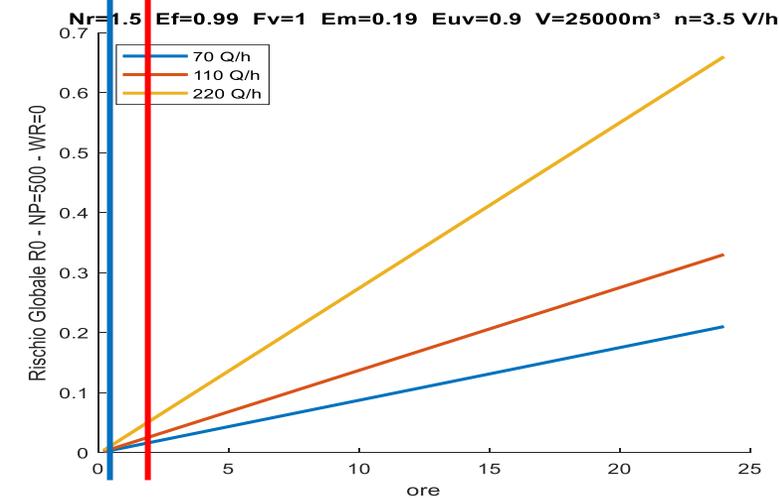
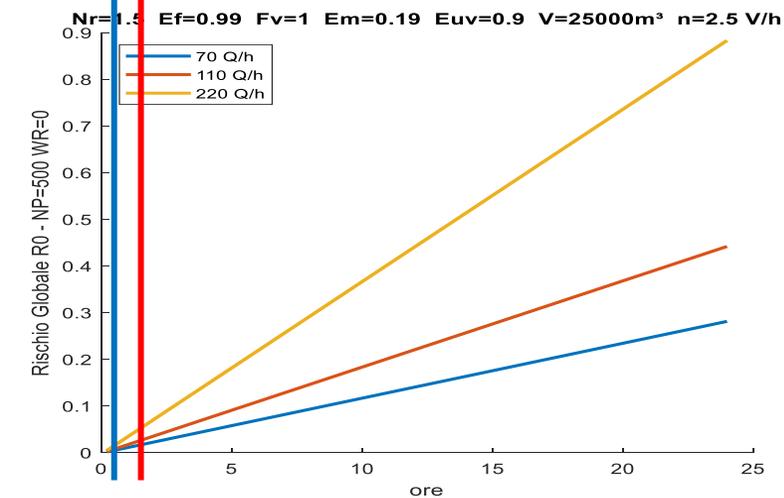
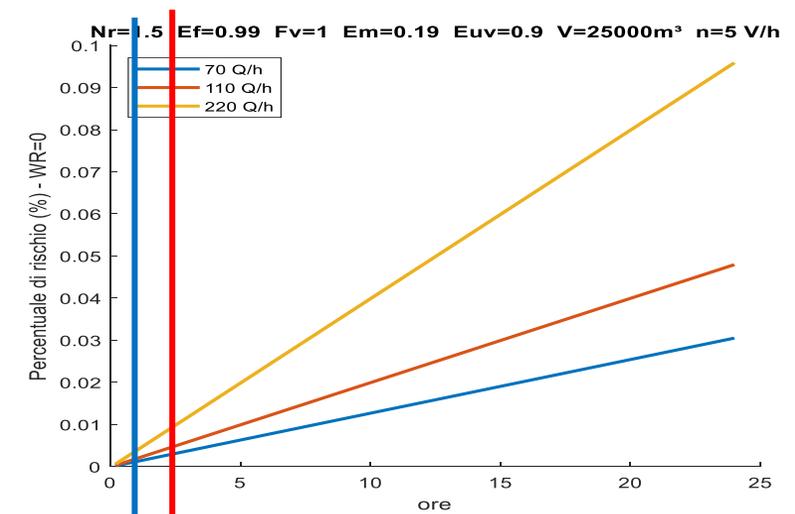
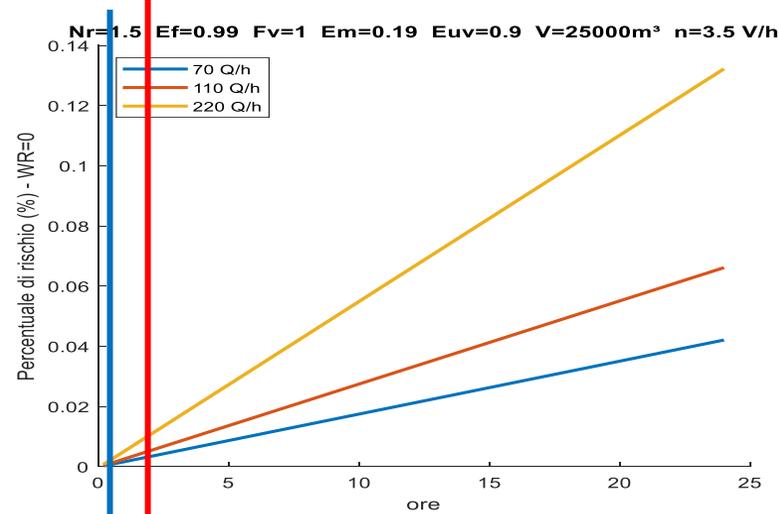
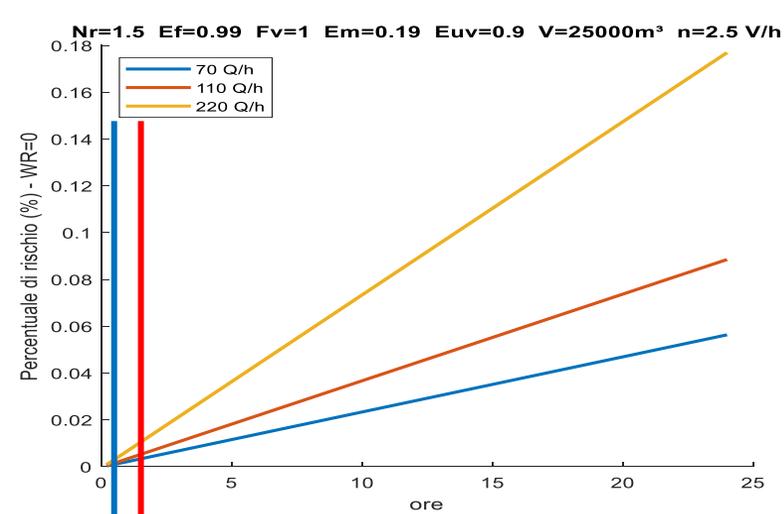
Relazione di Gammaitoni – Nucci modificata fa Fisk e Nazaroff

Calcolo del rischio di contagio individuale (P) per un negozio da 540 m³ con ricircolo, filtri, mascherine e lampade UV. Si ha anche il Rischio Globale, $R_0=(N_{p-1}) * P$ per N_p persone.

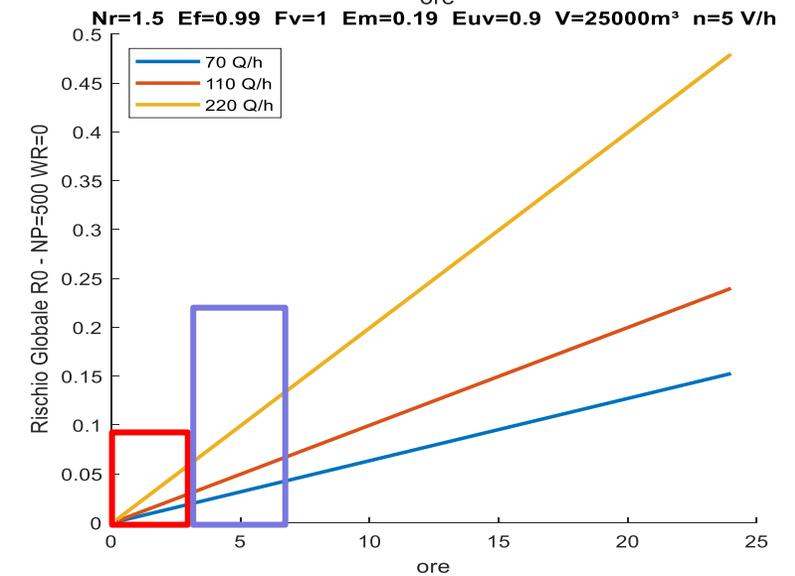
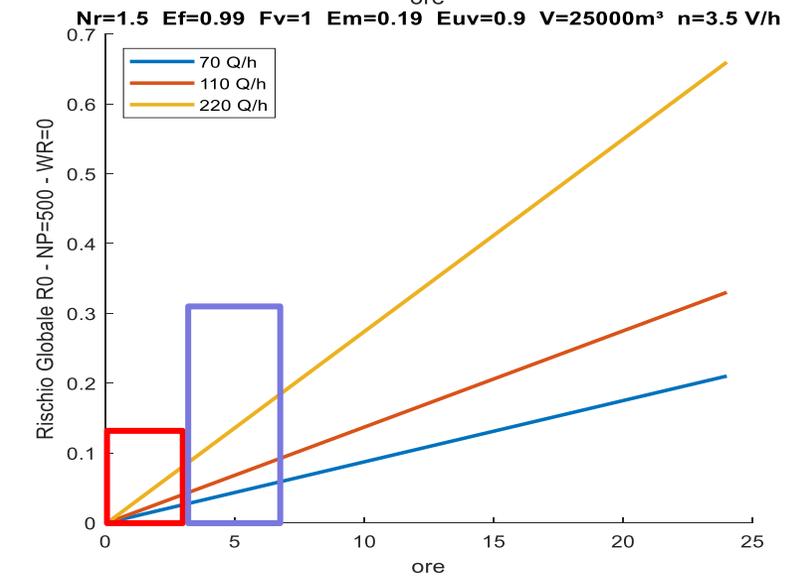
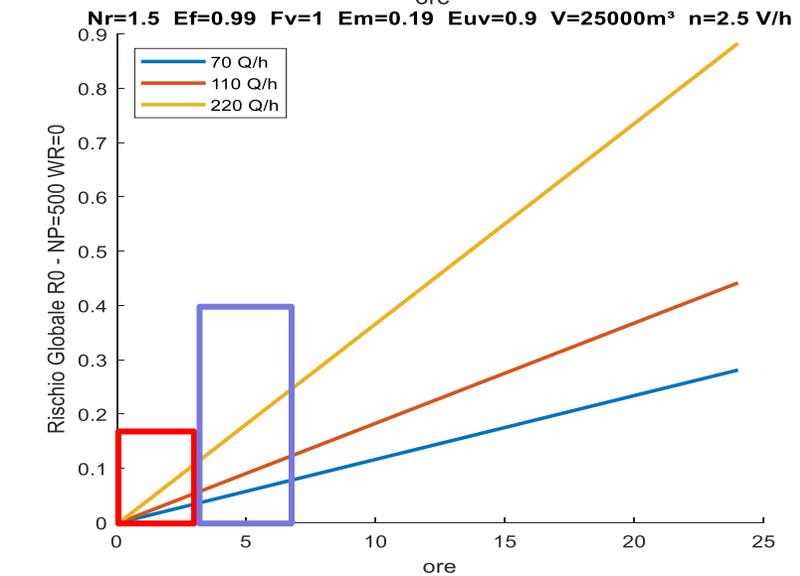
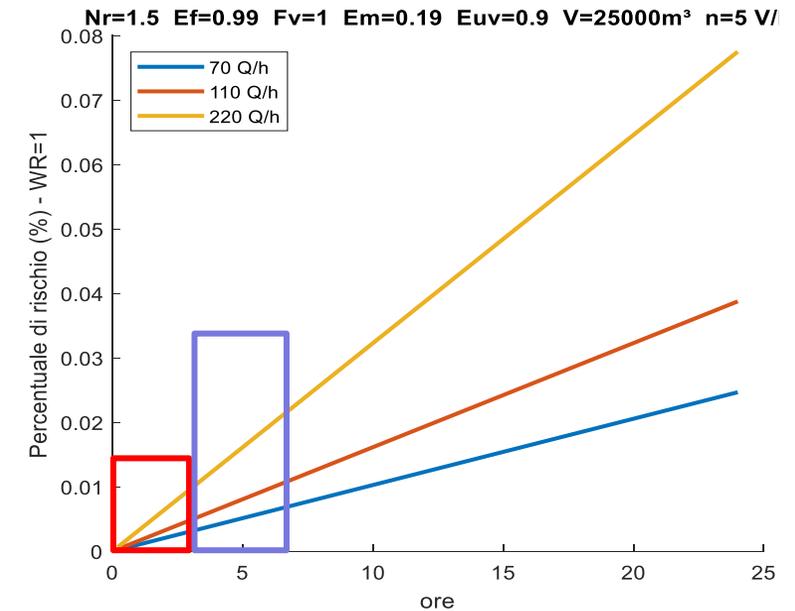
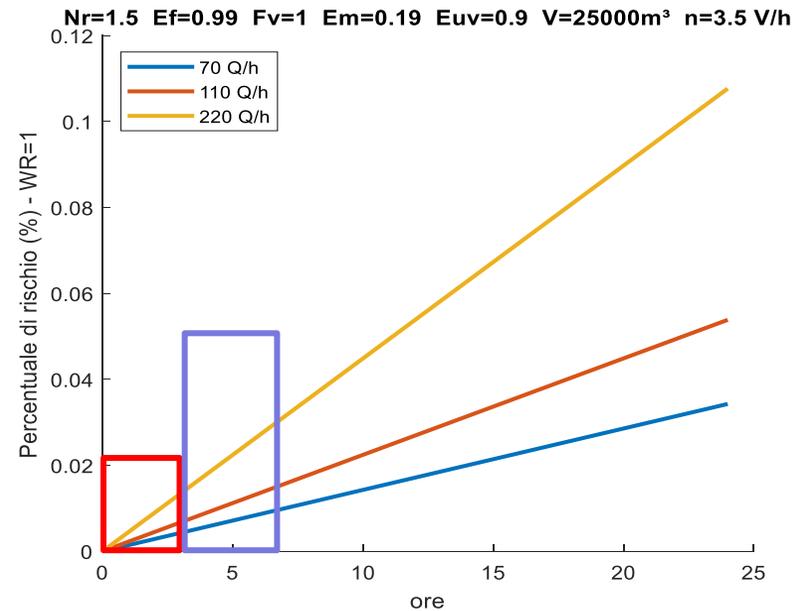
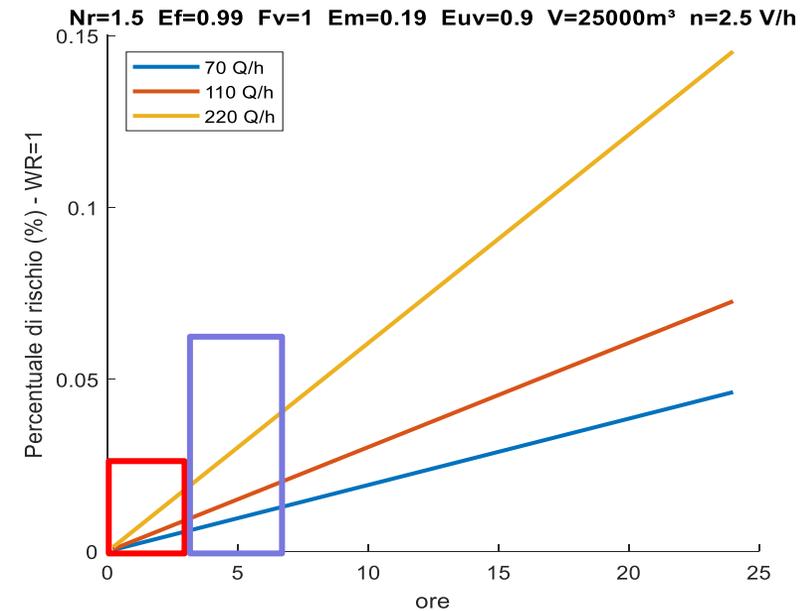


Relazione di Gammaitoni – Nucci modificata fa Fisk e Nazaroff

Calcolo del rischio di contagio individuale (P) per un supermercato da 25.000 m³ con ricircolo, filtri, mascherine e lampade UV. Si ha anche il **Rischio Globale**, $R_0=(N_{p-1}) * P$ per N_p persone.



Confronto dei calcoli con Walls-Riley e Gammaitoni – Nucci



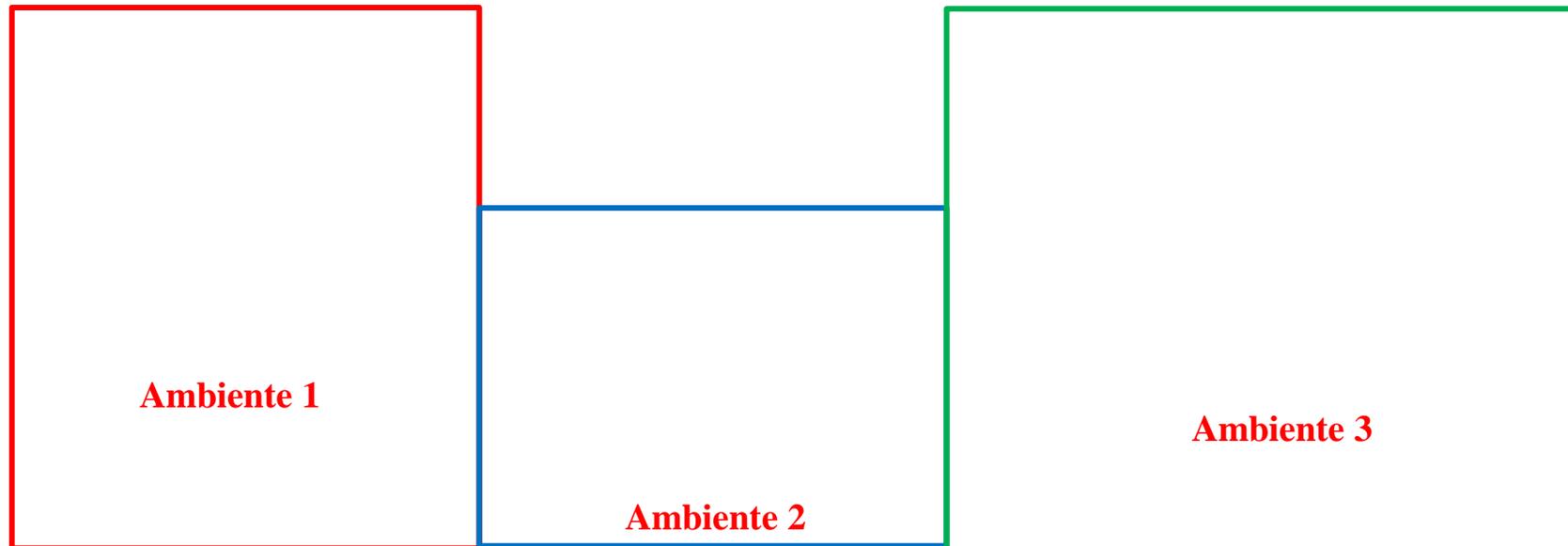
Azioni per la riduzione del rischio di contagio

Le relazioni viste in precedenza, sia di **Walls-Riley** che di **Gammaitoni-Nucci**, si applicano in presenza di **omogeneità di condizioni**.

Più precisamente per persone **suscettibili** debbono avere **pari condizioni di esposizione in termini di produzione di quanta/h**.

Nel caso in cui quest'ipotesi non possa essere verificata **occorre suddividere il volume in più sottovolumi, cioè in più zone**, all'interno delle quali ci sia **parità di condizioni** di esposizione.

Negli esempi che seguono si presume valida la **parità di condizioni di esposizione** e quindi tutti i suscettibili nell'ufficio, nel supermercato e nelle scuole sia sempre nelle stesse condizioni.



***RELAZIONE DI GAMMAITONI – NUCCI
CALCOLO IN CONDIZIONI NON STAZIONARIE***

Relazione di Gammaitoni – Nucci in condizioni non stazionarie

La relazione di **Gammaitoni - Nucci** si presta bene al calcolo in condizioni non stazionarie e con eventuale presenza di **quanta** iniziali, N_0 .

La relazione usata è la **variante B)** che nella forma corretta da **Fisk e Nazaroff** è:

$$P = \left(1 - e^{-\frac{f_{masc} P \cdot q I}{V} C_d t + e^{-C_d t} - 1 - \left(\frac{C_d N_0}{q} \right) e^{-C_d t} + \frac{C_d N_0}{q}} \right) \cdot 100$$

Non si ripete la simbologia già citata nelle pagine precedenti.

Si ricordi che la modifica di **Fisk e Nazaroff** porta a calcolare i termini relativi al numero di ricambi orari corretto e il fattore di riduzione per l'utilizzo delle mascherine protettive:

$$C_d = \lambda_{ventilazione} + \lambda_{filtrazione} \cdot \eta_{filtro} + \lambda_{UN} \cdot \eta_{UV} + \lambda_{deposito}$$

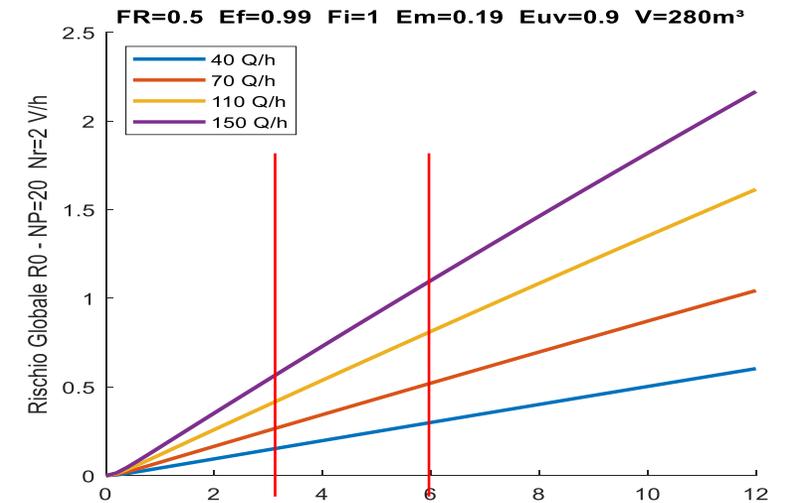
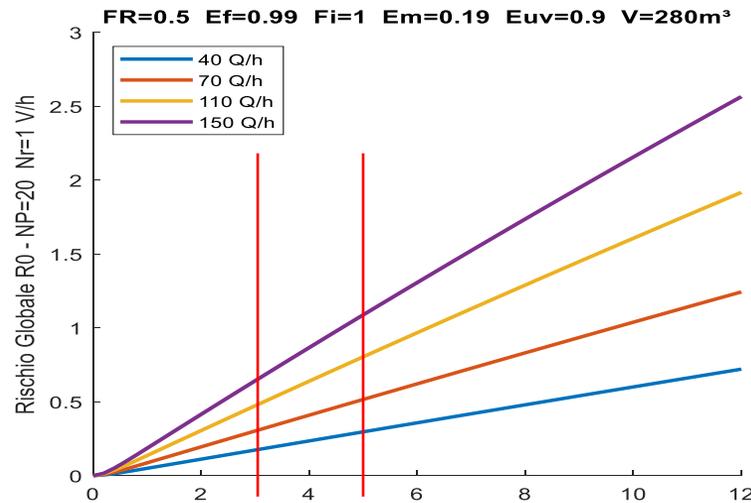
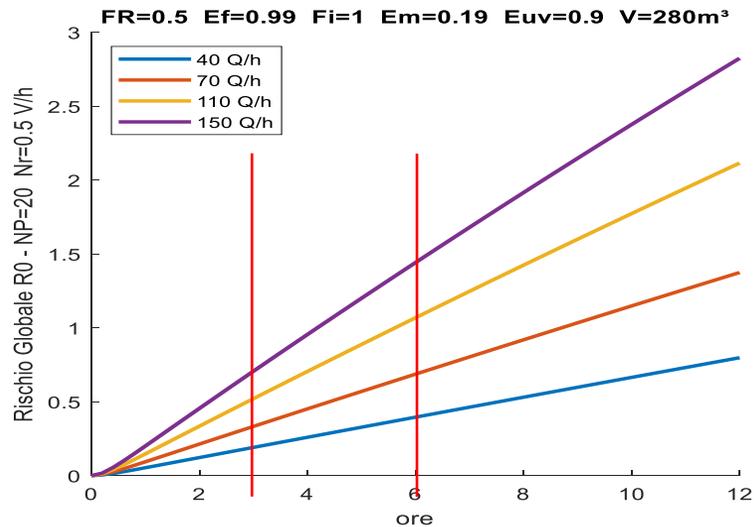
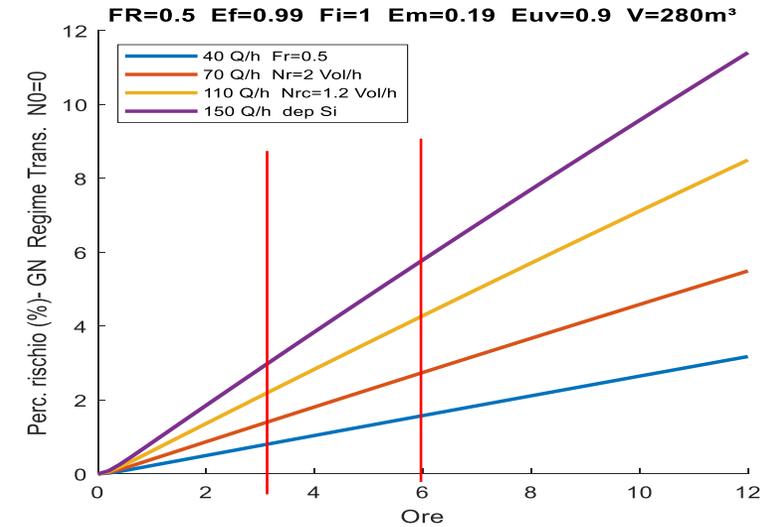
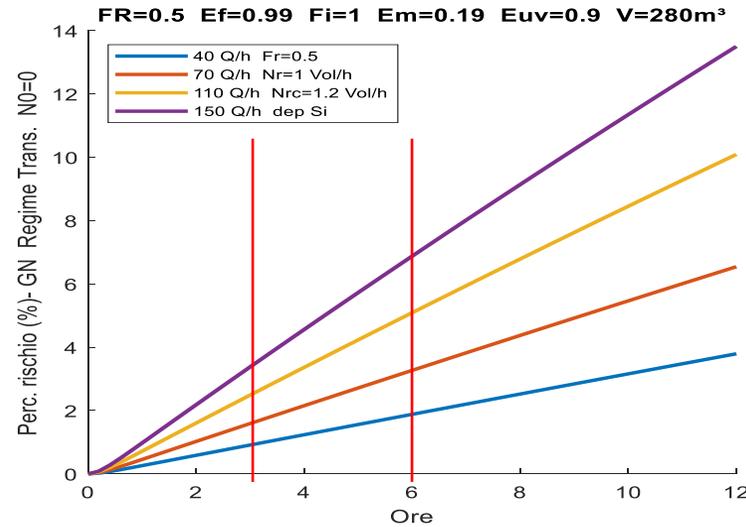
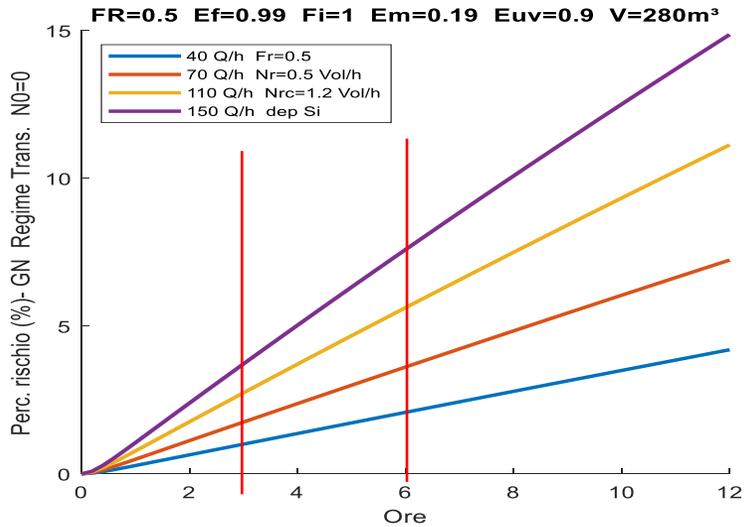
$$f_{masc} = \left[100 - \left(X - \frac{X \cdot Y}{100} \right) \right] \%$$

Valgono i simbolismi già indicati in precedenza.

Si presentano ora alcuni esempi con riferimento ad un'aula scolastica, un ufficio e un supermercato, come fatto in precedenza per le altre formulazioni.

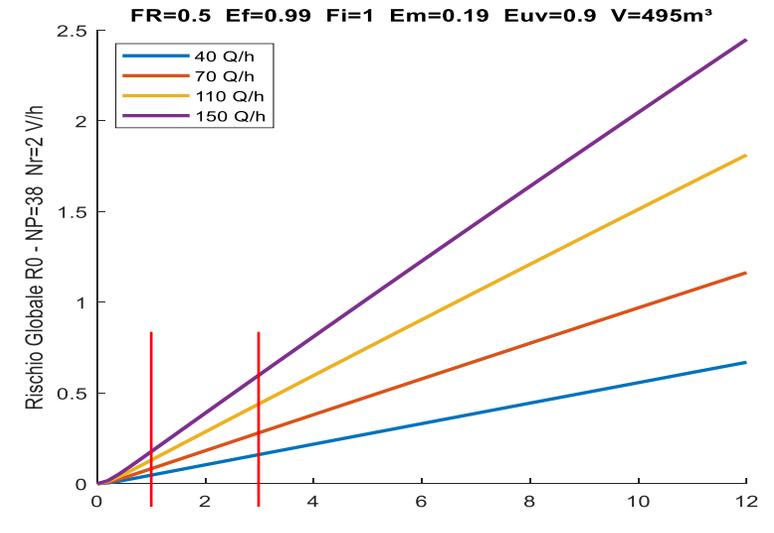
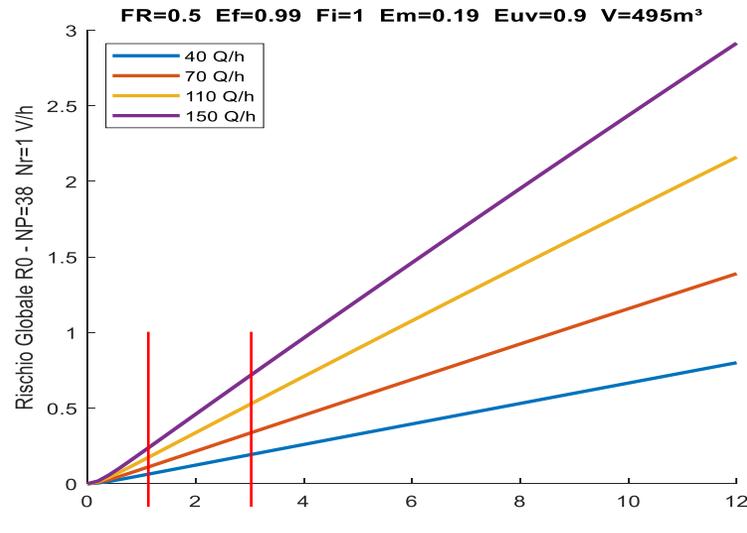
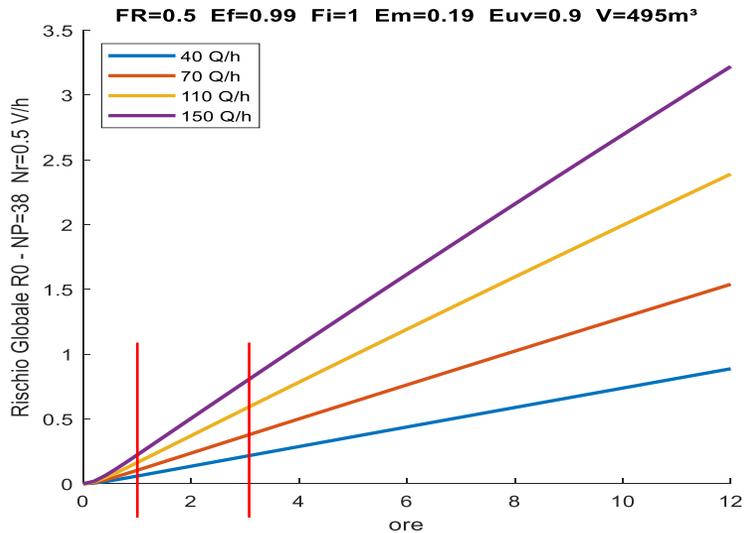
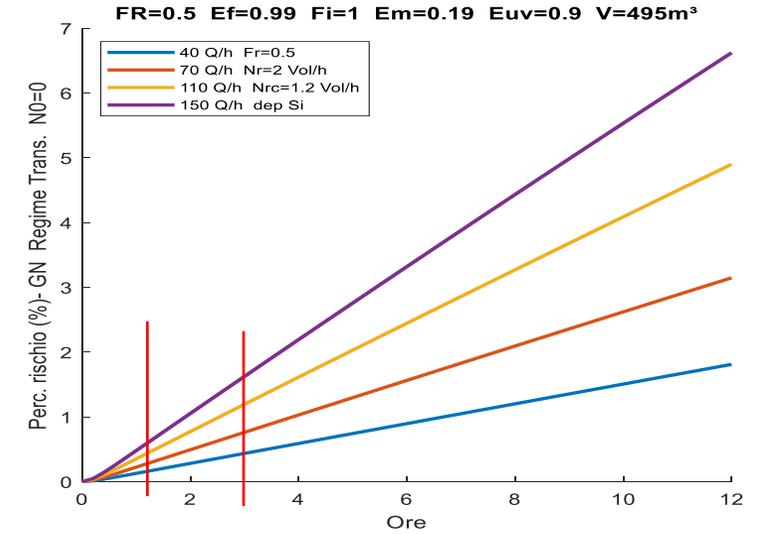
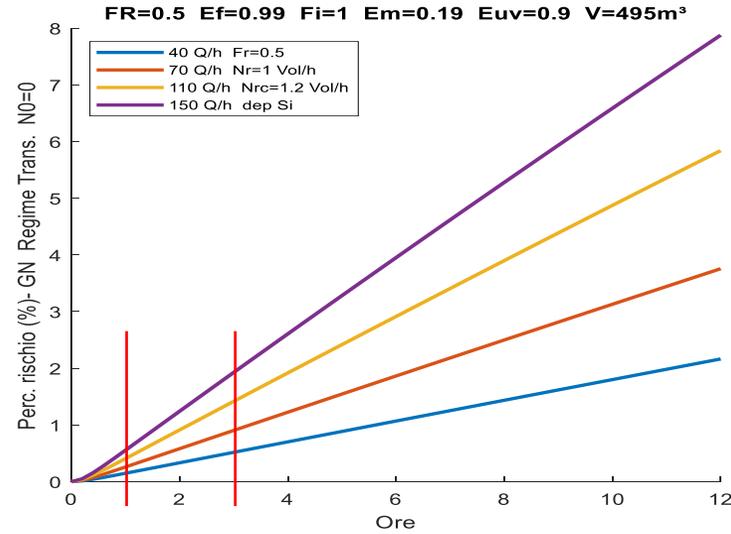
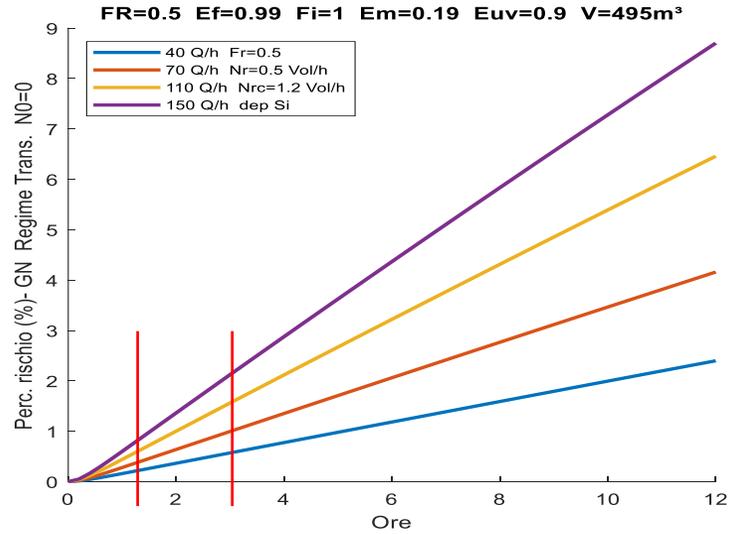
Relazione di Gammaitoni – Nucci in condizioni non stazionarie

Aula scolastica da **280** m³ con filtri ad alta efficienza e lampade UV, mascherine e 21 soggetti.



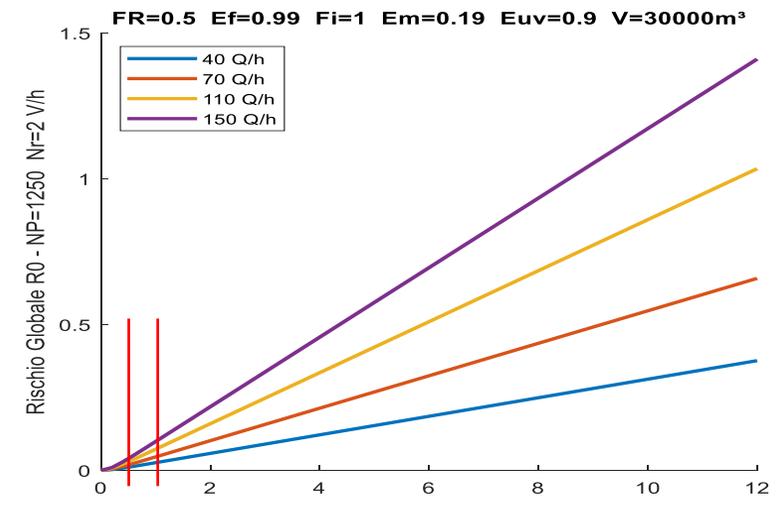
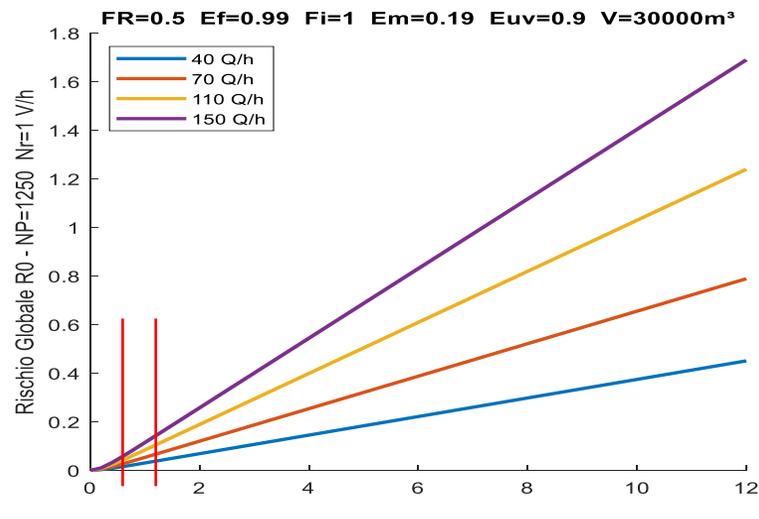
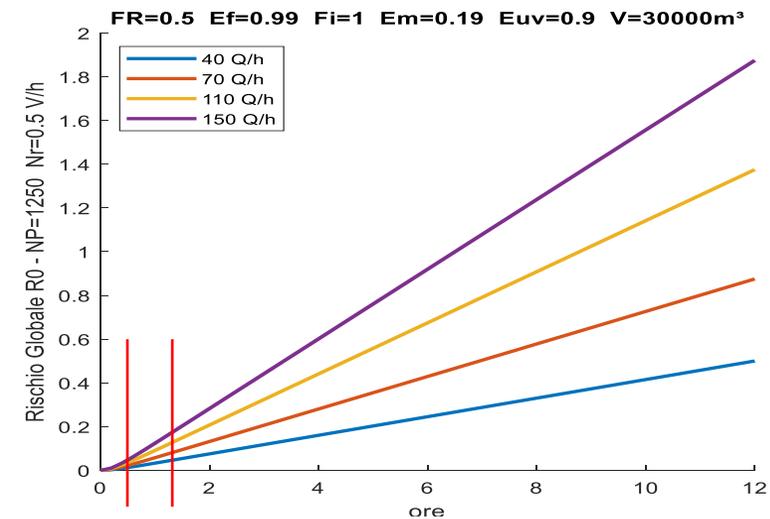
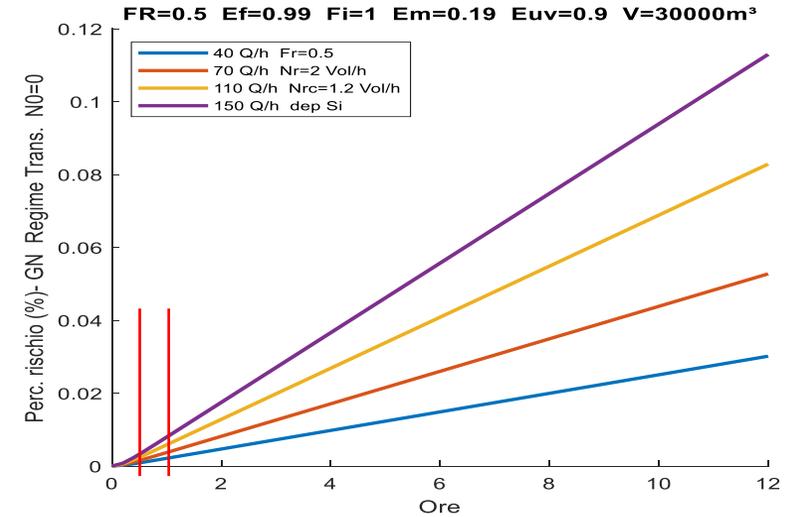
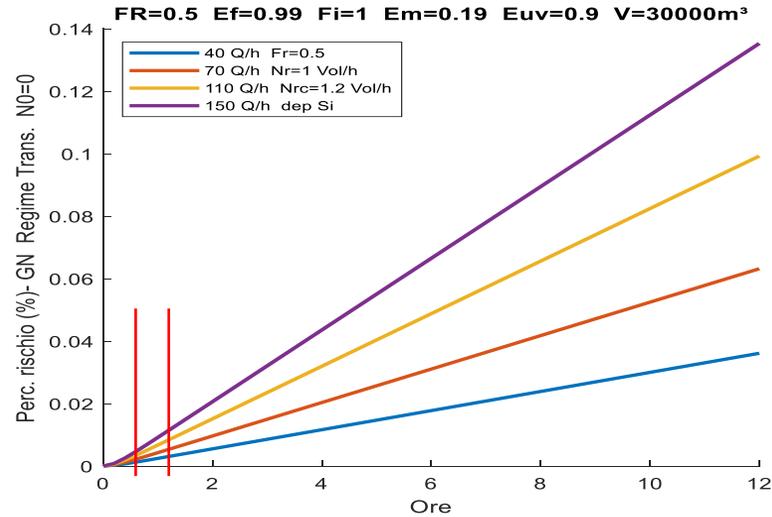
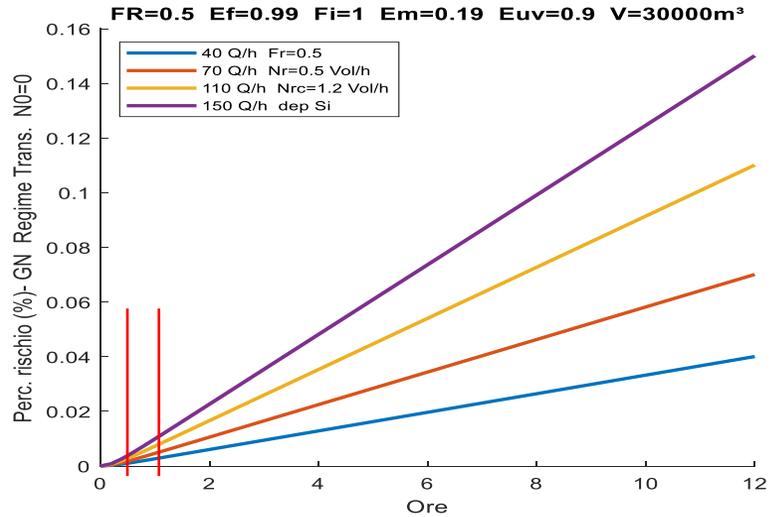
Relazione di Gammaitoni – Nucci in condizioni non stazionarie

Ufficio da **495 m³** con filtri ad alta efficienza, Lampade UV e mascherine e 39 soggetti:



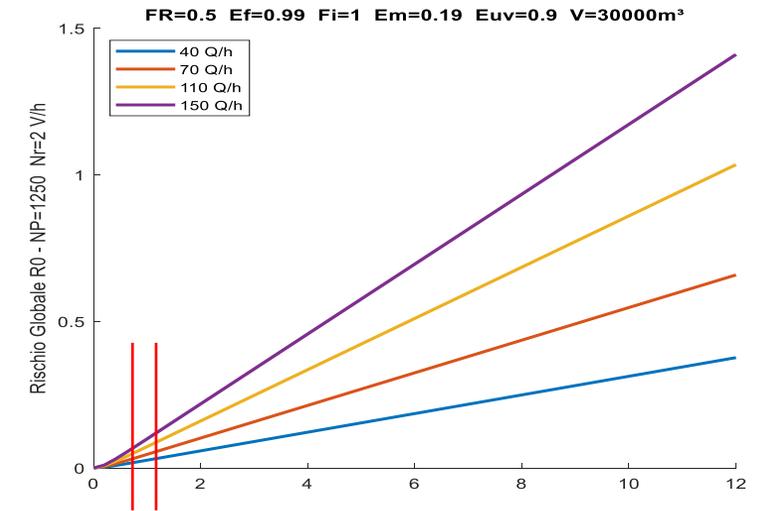
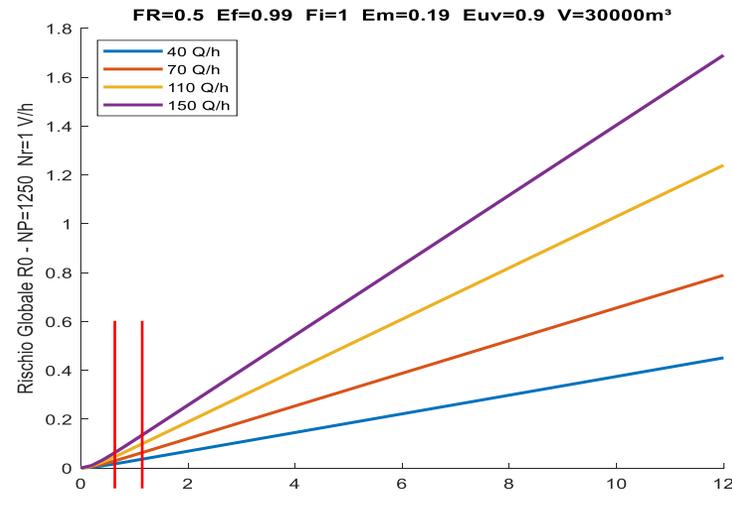
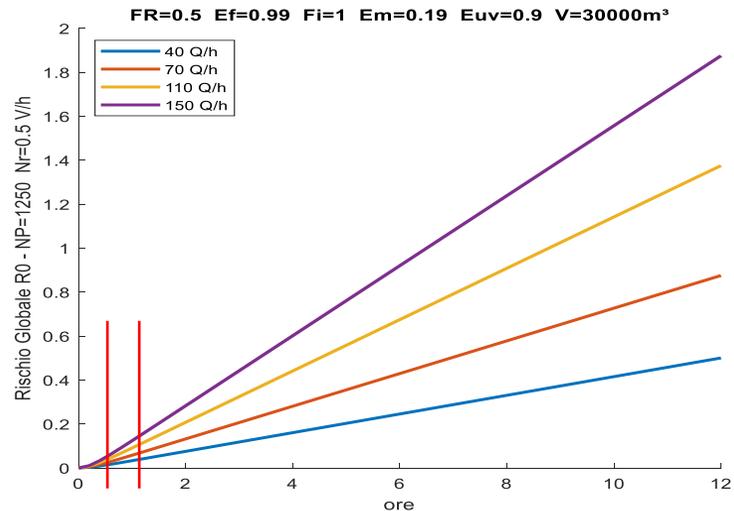
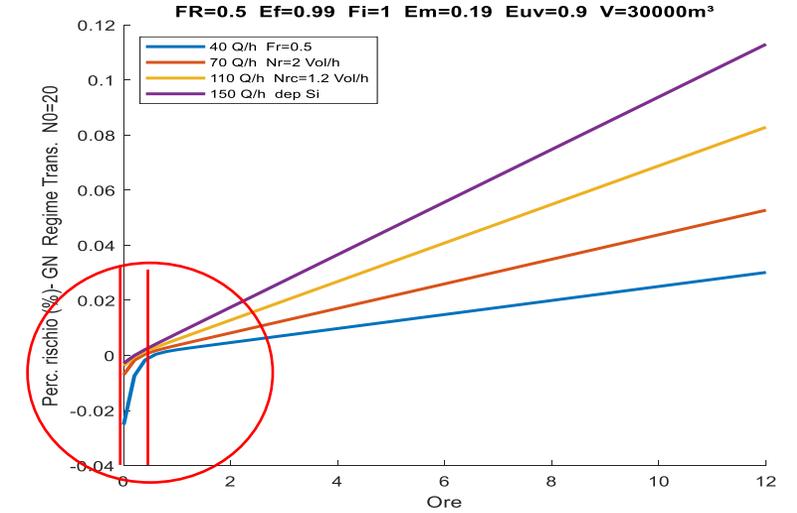
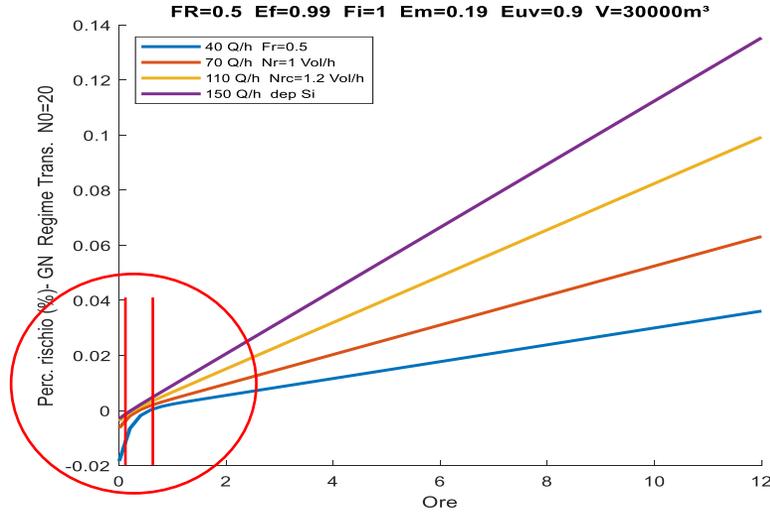
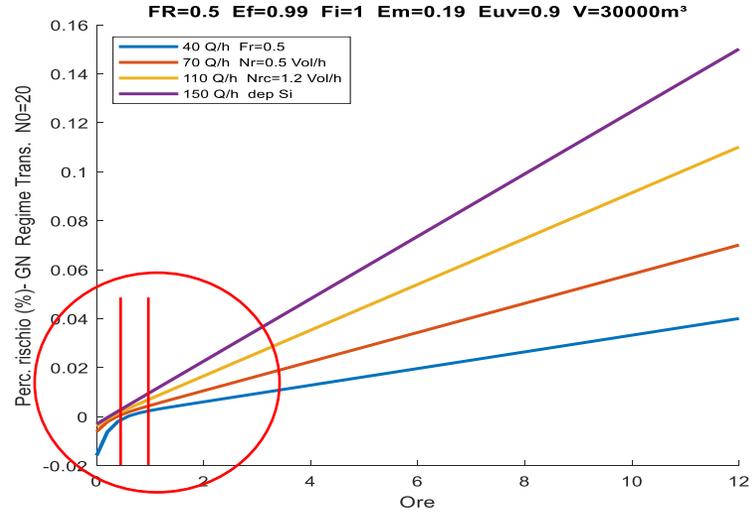
Relazione di Gammaitoni – Nucci in condizioni non stazionarie

Supermercato da 30,000 m³ con filtri, lampade UV, mascherine e 1251 soggetti



Relazione di Gammaitoni – Nucci in condizioni non stazionarie

Supermercato 30,000 m³, filtri, lampade UV, mascherine e 1251 soggetti e 20 quanta iniziali



Relazione di Gammaitoni – Nucci in condizioni non stazionarie

Gli esempi mostrati in precedenza mostrano la grande sensibilità del metodo **Gammaitoni-Nucci** in condizioni non stazionarie.

Interessante è il caso del supermercato con **$N_0=20$ quanta** iniziali (ad esempio, per un soggetto infetto della pulizia prima dell'apertura al pubblico).

Si osserva il transitorio iniziale di circa un'ora con livelli di probabilità di contagio un po' più elevata rispetto al caso di assenza di sorgente iniziale.

Questo comportamento giustifica la richiesta di AICARR di avviare gli impianti di climatizzazione almeno **12 ore** prima dell'apertura in modo che la carica infettiva iniziale possa essere smaltita.

Nelle condizioni di figura, supponendo che gli impianti siano avviati immediatamente prima dell'ingresso del pubblico, si hanno rischi di contagio più elevati nella prima ora.

Il modello avrebbe dato risposta anche alla variazione dei **quanta/h** durante la giornata per effetto del ricambio dei soggetti ospiti del supermercato o di cambio turni di lavoro.

Data la notevole complessità delle combinazioni possibili, si ritiene poco utile effettuare una così lunga serie di simulazioni.

***RIESAME DEL CASO DI TRASMISSIONE DI SARS-COV-2
NELLO «SKAGIT VALLEY CHORALE»
DETERMINAZIONE DELLA PRODUZIONE DEI QUANTA
CON IL METODO DI GAMMAITONI - NUCCI***

Determinazione dei quanta/h nello Skagit Valley Chorale

Gammaitoni e **Nucci** calcolano i **quanta** necessari per una assegnata **probabilità di contagio** mediante la relazione, già vista in precedenza:

$$q = \frac{V \cdot I}{p} \frac{C_d^2}{C_d t + e^{-C_d t} - 1} \log \left(1 - \frac{N_i}{N_p - 1} \right)$$

con il seguente simbolismo:

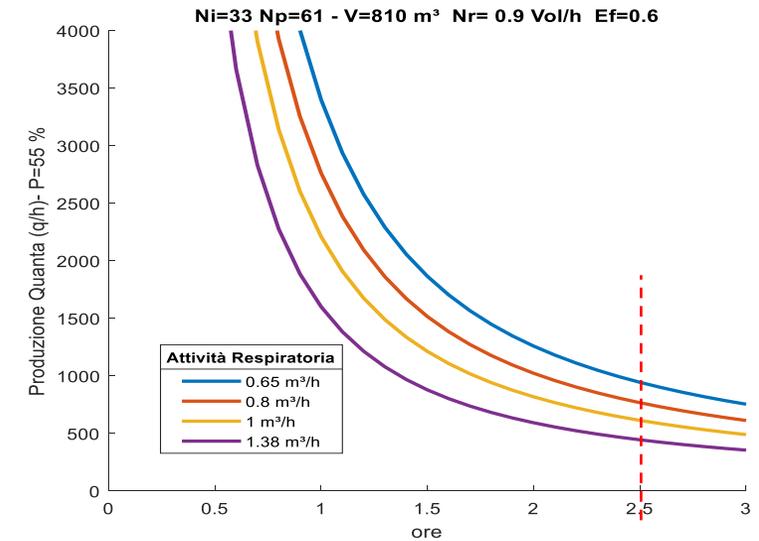
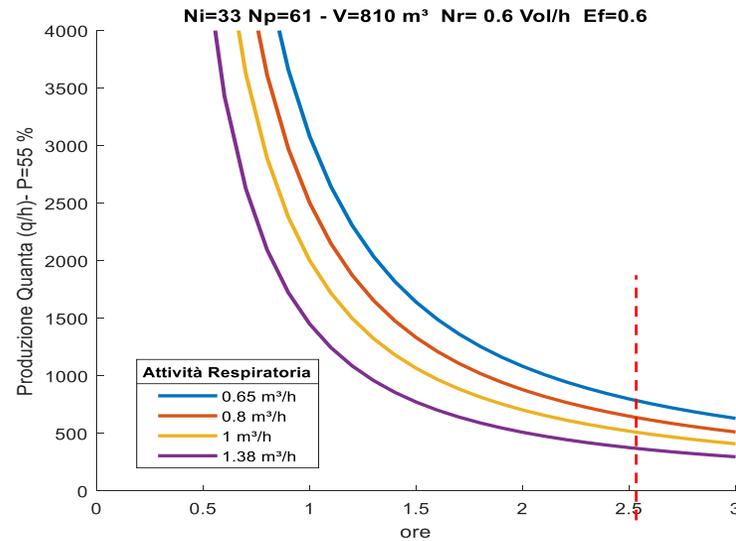
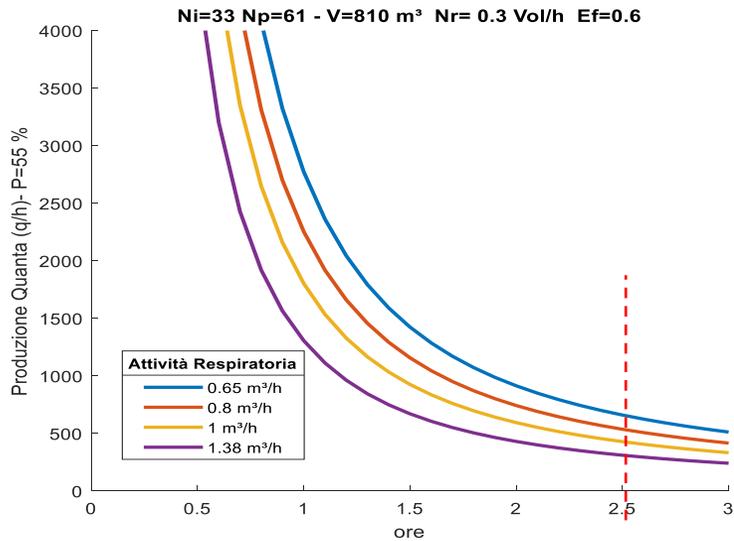
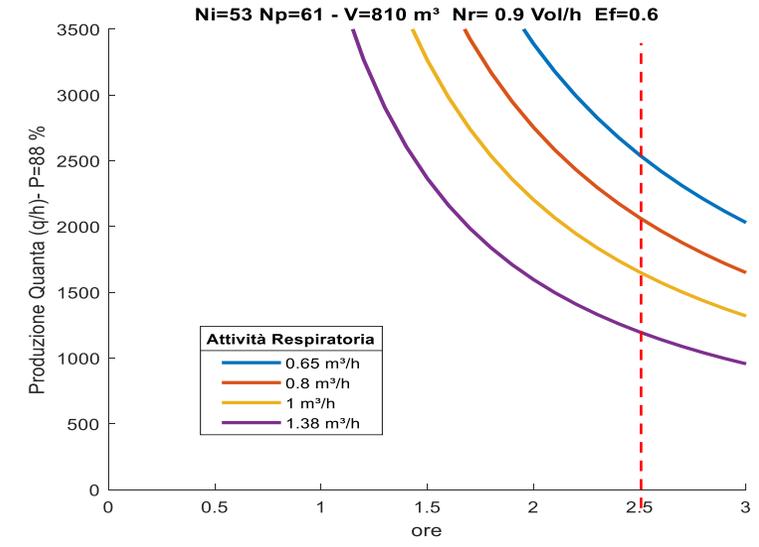
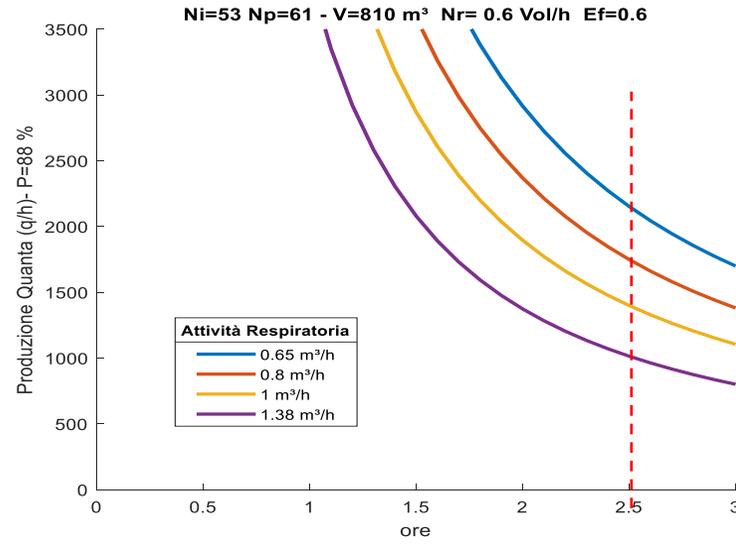
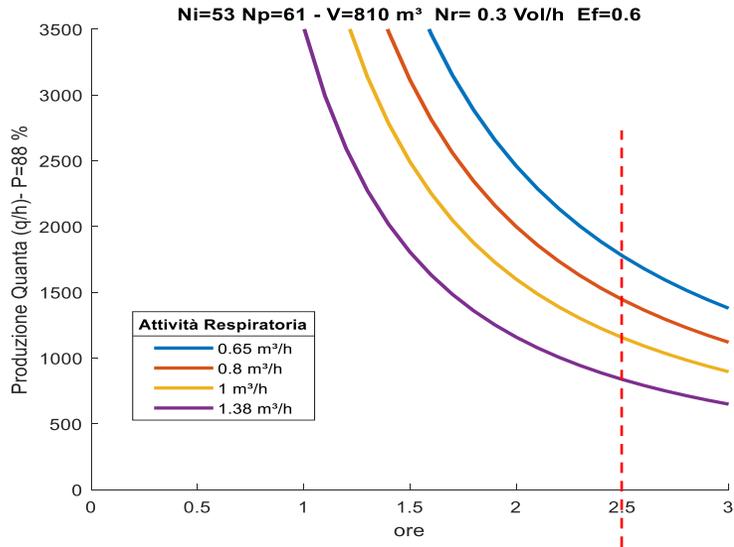
- V Volume dell'ambiente, m³;
- p Attività respiratoria di ogni soggetto, m³/h;
- C_d coefficiente di perdita dei quanta (o anche numero di ricami orari corretto), Vol/h;
- t Tempo di permanenza nell'ambiente, h.
- S Soggetti suscettibili infetti;
- S_0 Soggetti suscettibili inizialmente presenti;
- $P = \frac{S}{S_0}$ Probabilità di contagio verificatasi nell'ambiente.

Se tutti i termini di questa relazione sono noti, il calcolo del numero dei **quanta**, q , è esplicito.

Nel caso in esame occorre fare diversi calcoli per tenere conto della variabilità dei parametri di calcolo. Negli abachi seguenti si hanno sei casi simulati per varie attività respiratorie.

Il valore di C_d è calcolato in varie ipotesi di ventilazione dell'aria fresca esterna.

Determinazione dei quanta/h nello Skagit Valley Chorale – GN inv



Determinazione dei quanta/h nello Skagit Valley Chorale – GN inv

Gli abachi sono organizzati su due righe:

- Nella prima riga si un numero di infetti $N_i=53$ e l'aria di rinnovo è pari a $N_r=0.3, 0.6 0.9$ Vol/h;
- Nella prima riga si un numero di infetti $N_i=33$ e l'aria di rinnovo è pari a $N_r=0.3, 0.6 0.9$ Vol/h.

Ciascun abaco, in entrambe le righe, riporta 4 curve relative ad una attività di respirazione pari a $p= 06, 0,8, 1,0, 1,38$ m³/h. Rimangono fissati:

- $E_f = 0.6$ Efficienza dei filtri per l'aria esterna MERV 11;
- $\lambda_{dep} = 0,7$ Perdite per deposizione sul terreno dei droplet, Vol/h;
- $\lambda_{inatt} = 0,0$ Perdite per inattivazione dei droplet, Vol/h.

Questa scelta è stata dettata dalla grande variabilità dei risultati ottenuti. Gli autori hanno effettuato 1000 simulazioni facendo variare i parametri negli intervalli riportati nella tabella:

Parameter	Value(s)	Distribution
Probability of Infection, p (%)	53-87	Uniform
Volumetric Breathing Rate, Q_b (m ³ h ⁻¹)	0.65-1.38	Uniform
Loss Rate due to Ventilation, λ_v (h ⁻¹)	0.3-1.0	Uniform
Loss Rate due to Deposition onto Surfaces, λ_{dep} (h ⁻¹)	0.3-1.5	Uniform
Loss Rate due to Virus Inactivation, k (h ⁻¹)	0-0.63	Uniform
Volume of Rehearsal Hall, V (m ³)	810	Constant
Duration of Rehearsal, D (h)	2.5	Constant

Determinazione dei quanta/h nello Skagit Valley Chorale – GN inv

Per $N_i=33$ i quanta corrispondenti variano da:

Per la prima riga di simulazioni:

- 1° caso (53 infetti) : da 1000 a 1700 **quanta/h** per le varie attività respiratorie;
- 2° caso (53 infetti) : da 1200 a 2200 **quanta/h** per le varie attività respiratorie;
- 3° caso (53 infetti) : da 1250 a 2650 **quanta/h** per le varie attività respiratorie;

Per la seconda riga di simulazioni:

- 1° caso (33 infetti) : da 400 a 700 **quanta/h** per le varie attività respiratorie;
- 2° caso (33 infetti) : da 450 a 950 **quanta/h** per le varie attività respiratorie;
- 3° caso (33 infetti) : da 500 a 1000 **quanta/h** per le varie attività respiratorie.

Si conclude che, dall'analisi inversa della relazione di **Gammaitoni-Nucci** la produzione oraria di quanta varia:

- Per 53 infetti da un minimo 1000 a 2650 **quanta/h**;
- Per 33 infetti da un minimo 700 a 1000 **quanta/h**.

In definitiva per il caso della Skagit Valley Chorale la produzione dei quanta calcolata varia, per entrambi i casi di infetti, da 700 a 2650 **quanta/h** con un valore medio di **1675 quanta/h**.

Si ricorda che gli autori hanno determinato una variabilità fra 550 (decimo percentile) e 1510 (novantesimo percentile) **quanta orari** e che hanno proposto un valore medio pari a **900 quanta/h**.

Determinazione dei quanta/h nello Skagit Valley Chorale – GN dir

Come fatto per il metodo di **Rudnick – Milton** possiamo utilizzare la formulazione diretta del metodo di **Gammaitoni-Nucci** per determinare la produzione oraria dei quanta o, quantomeno, la variabilità della produzione.

Si hanno due serie di abachi così organizzati:

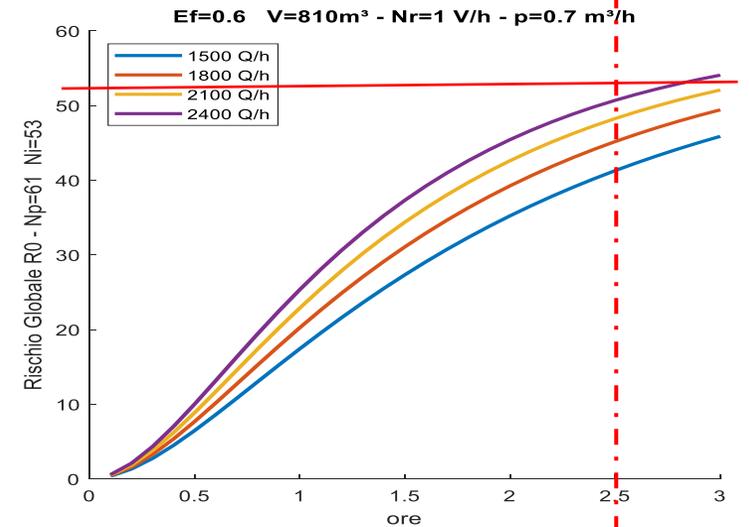
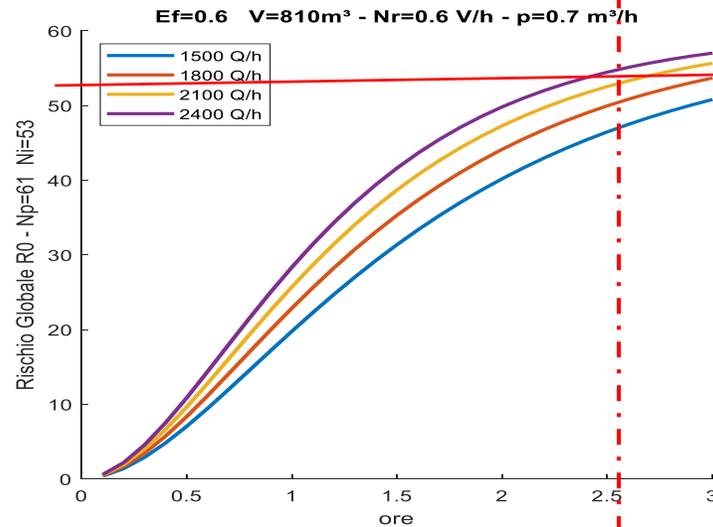
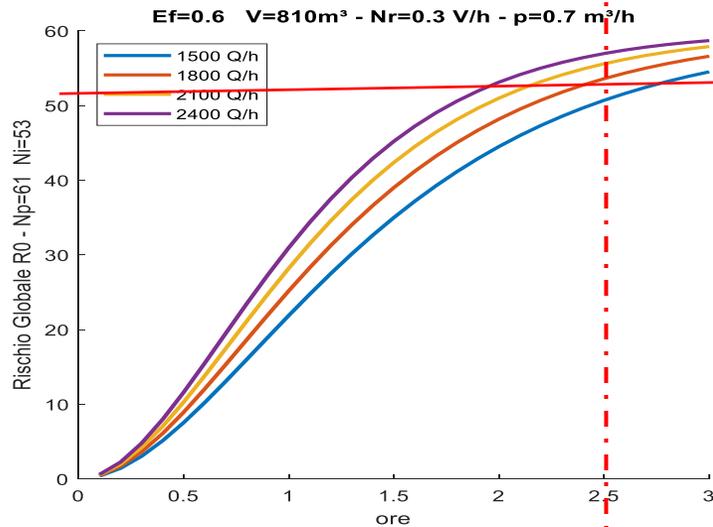
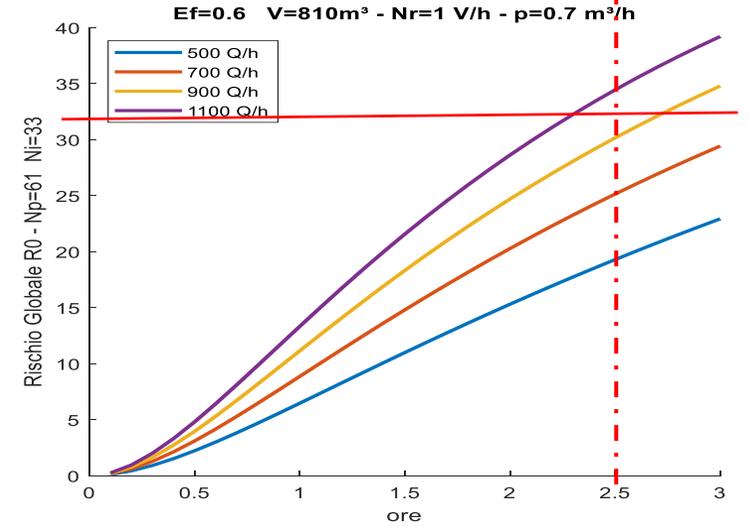
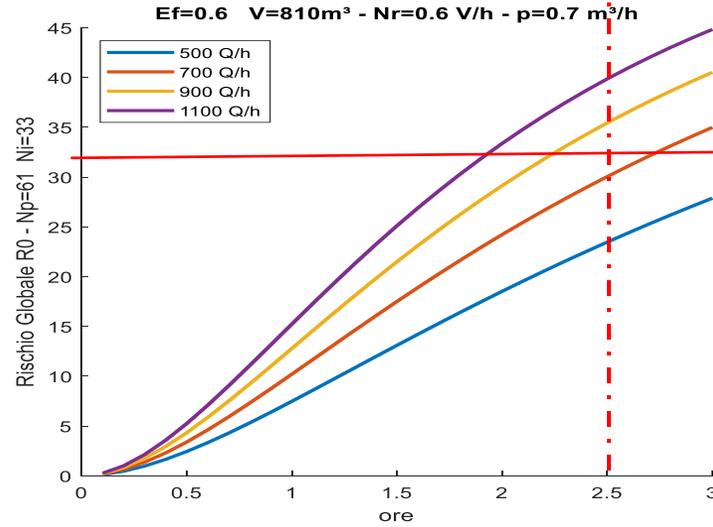
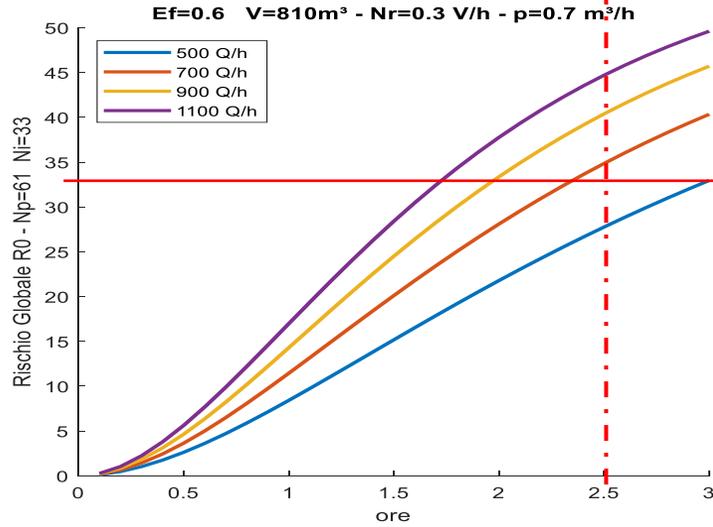
1. **Abaco -1** : Attività di respirazione $p=0,7 \text{ m}^3/\text{h}$, efficienza filtri $E_f=0.6$, numero di ricambi di aria esterna $N_r=0,3, 0,6, 0,9 \text{ Vol/h}$. La prima riga si riferisce al caso di $N_i=33$ infetti mentre la seconda riga si riferisce al caso di $N_i=53$ infetti;
2. **Abaco -2** : Attività di respirazione $p= 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, efficienza filtri $E_f=0.6$, numero di ricambi di aria esterna $N_r=0,3, 0,6, 0,9 \text{ Vol/h}$. La prima riga si riferisce al caso di $N_i=33$ infetti mentre la seconda riga si riferisce al caso di $N_i=53$ infetti.

Con il metodo diretto si calcolano direttamente i contagi globali, R_{a0} , per le condizioni sopra indicate per ciascun abaco.

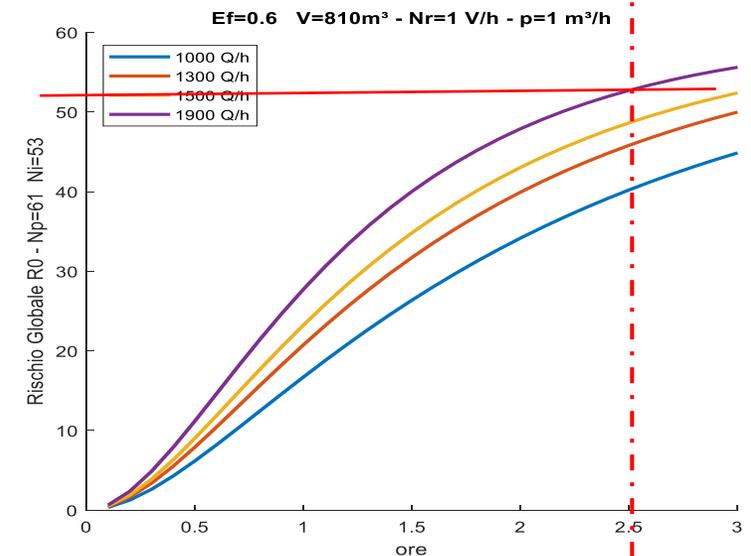
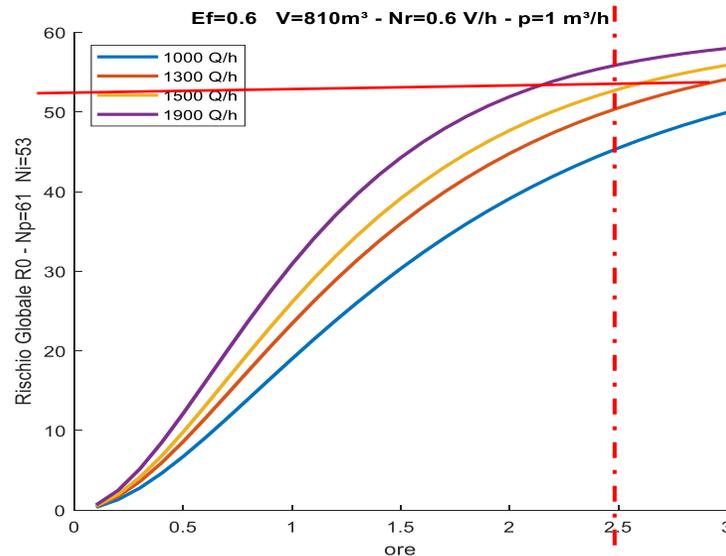
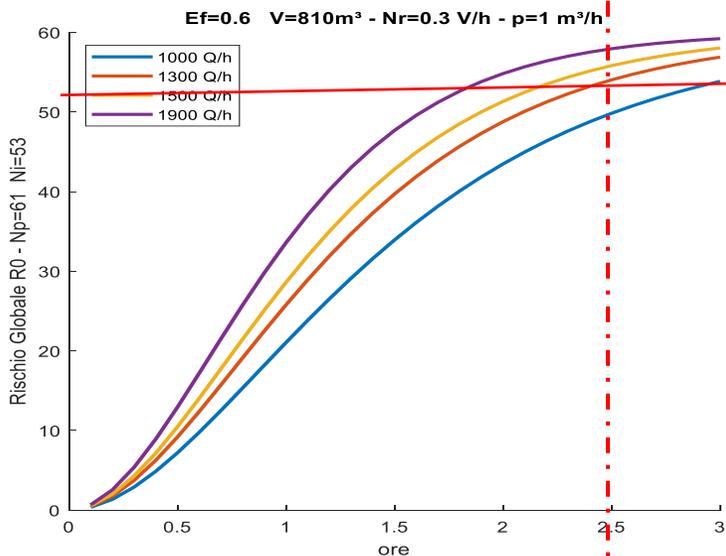
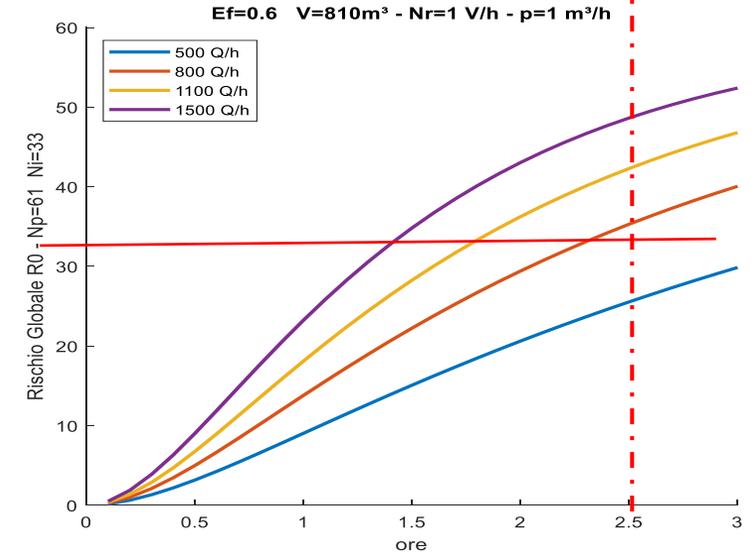
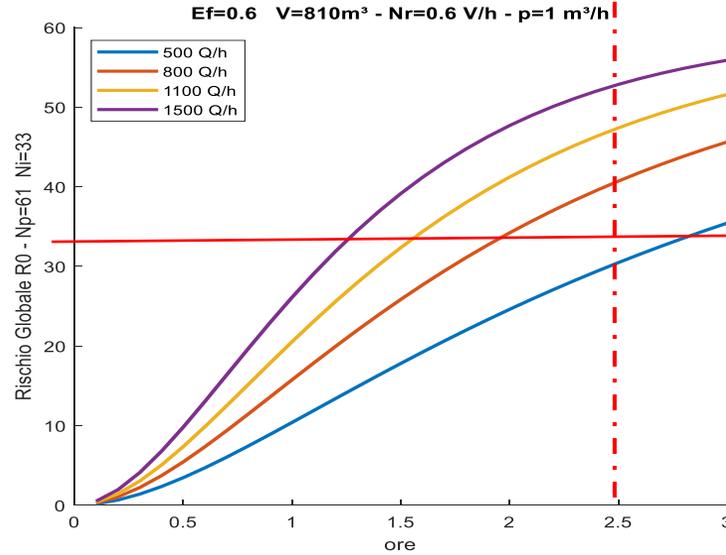
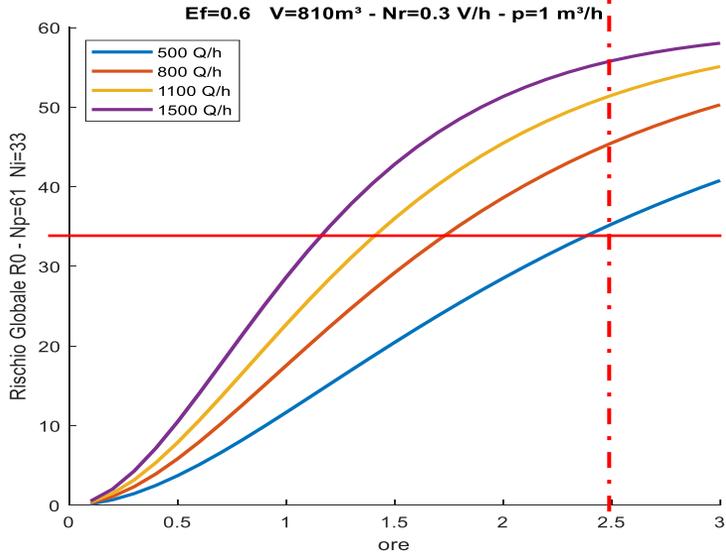
In corrispondenza di $R_{a0}=33$ e $R_{a0}=53$ e il tempo limite di 2,5 h, indicato dagli autori, si possono leggere i valori dei **quanta/h** corrispondenti.

Si ricorda che, come descritto nella pubblicazione indicata, l'aria esterna proviene da un generatore di aria calda che filtra l'aria con un filtro MERV 11 prima di inviarla al teatro per le prove corali. Non si ha certezza sulla continuità di funzionamento del generatore né sul controllo della temperatura interna.

Determinazione dei quanta/h nello Skagit Valley Chorale – GN dir



Determinazione dei quanta/h nello Skagit Valley Chorale – GN dir



Determinazione dei quanta/h nello Skagit Valley Chorale – GN dir

Dal primo abaco si deducono i seguenti risultati:

- Dal **primo abaco** per $p= 0.7 \text{ m}^3/\text{h}$: per $N_i=33$ si ha:
 - Primo caso: $N_r=0.3 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è pari a 680 quanta/h;
 - Secondo caso: $N_r=0,6 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è pari a 800 quanta/h;
 - Terzo caso: $N_r=0,6 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è pari a 1000 quanta/h;
- Dal **primo abaco** per $p= 0,7 \text{ m}^3/\text{h}$: per $N_i=53$ si ha:
 - Primo caso: $N_r=0.3 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è pari a 1900 quanta/h;
 - Secondo caso: $N_r=0,6 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è pari a 2350 quanta/h;
 - Terzo caso: $N_r=0,6 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria indeterminata;
- Dal **secondo abaco** per $p= 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$: per $N_i=33$ si ha:
 - Primo caso: $N_r=0.3 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è indeterminata;
 - Secondo caso: $N_r=0,6 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è pari a 680 quanta/h;
 - Terzo caso: $N_r=0,6 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è pari a 750 quanta/h;
- Dal **secondo abaco** per $p= 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$: per $N_i=53$ si ha:
 - Primo caso: $N_r=0.3 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è pari a 1300 quanta/h;
 - Secondo caso: $N_r=0,6 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è pari a 1650 quanta/h;
 - Terzo caso: $N_r=0,6 \text{ Vol/h}$, la produzione oraria è pari a 1900 quanta/h;

Determinazione dei quanta/h nello Skagit Valley Chorale – GN dir

La variabilità della produzione oraria dei quanta è piuttosto elevata e così riassumibile:

- Per Ni= **33** la produzione varia da un minimo di **680** ad un massimo di **1000** quanta/h per le varie ipotesi effettuate;
- Per Ni= **53** la produzione varia da un minimo di **1300** ad un massimo di **2350** quanta/h per le varie ipotesi effettuate.

Possiamo concludere che la variabilità complessiva della produzione oraria dei quanta è compresa da un minimo di **680** quanta/h a **2350** quanta/h, con un valore medio di **1315 quanta/h**.

Con il metodo diretto si era determinato il valore medio di **1675 quanta/h**.

Si osserva che il caso qui studiato non brilla per certezza dei risultati a causa della grande variabilità dei parametri di calcolo e non solo di quelli.

Di certo si può concludere che nella **Skagit Valley Chorale** si è avuto un'emissione straordinaria di **quanta/h** valutabile nell'ordine di un migliaio di **quanta/h**.

L'attività corale esercitata durante le prove con emissione di un numero elevato (ma indeterminato) di droplet, la variabilità dell'attività di respirazione alla quale è associata l'emissione dei droplet, l'indeterminazione dei dati termotecnici sugli impianti non possono portare ad un calcolo unico e deterministico del valore cercato.

Basta scegliere intervalli diversi ed effettuare simulazioni diverse per ottenere risultati diversi e, in quanto tali, poco affidabili. In questo modo possiamo avere soltanto un **ordine di grandezza**.

SINTESI DELLE PROCEDURE DI CALCOLO DEL RISCHIO DI CONTAGIO PER VIA AEREA – PROGETTO E VERIFICA

$$P = \frac{C}{S} = \left(1 - e^{\left(-\frac{R_{masc} I_{qpt_{exp}}}{Q + \lambda_{UV} V + Q_r \eta_r} \right)} \right) 100$$

$$R_{masc} = \left[100 - \left(X - \frac{X \cdot Y}{100} \right) \right] \%$$

$$P = \left(1 - e^{-\frac{(p \cdot f_{masc}) q I}{V} \frac{C_d t + e^{-C_d t} - 1 - \left(\frac{C_d n_0}{q I} \right) e^{-C_d t} + \frac{C_d n_0}{q I}}{C_d^2}} \right) * 100$$

$$C_d = \lambda_{ventilazione} + \lambda_{filtrazione} \cdot \eta_{filtro} + \lambda_{UN} \cdot \eta_{UV} + \lambda_{deposito}$$

$$f_{masc} = \left[100 - \left(X - \frac{X \cdot Y}{100} \right) \right] \%$$

Le procedure di calcolo del rischio individuale - Progetto

Possiamo suddividere in due fasi le procedure di calcolo del rischio da contagio da COVID-19:

1. **Progetto**: **calcolo del rischio di contagio** note le caratteristiche dimensionale dell'ambiente, le tipologie di impianto, utilizzo di sistemi di protezione (filtri, lampade U.V., mascherine), numero di soggetti **Suscettibili (S)** e di **Infetti (I)**;
2. **Verifica**: **calcolo della produzione dei quanta di infezione (quanta/h)** noti che siano i **Suscettibili (S)** e gli **Infetti (I)**.

La prima fase, *a priori*, è quella più diretta da un punto di vista ingegneristico perché consente di studiare, e quindi di progettare, le possibili protezioni atte a ridurre il rischio da contagio da **COVID-19**.

La seconda fase, *a posteriori*, consente di calcolare i **quanta/h effettivi** che si sono prodotti in un ambiente nel quale si sono avuti infetti. In questo modo si cercherà di comprendere quali sono stati i meccanismi che hanno attivato la malattia e in particolare:

- Se il contagio è avvenuto per **prossimità**, e quindi a breve distanza, per effetto dell'assorbimento diretto dei **droplet** o del contagio attraverso i depositi di **droplet**;
- Se il contagio è avvenuta per effetto dell'**aerosol** e quindi a lunga distanza, per effetto di mancanza di ventilazione adeguata e di sistemi di protezione aggiuntivi adeguati (filtri, lampade U.V., mascherine).

Per la fase di verifica, in assenza di mezzi di riduzione dei quanta, può risultare più comodo il metodo di **Rudnick e Milton** (non trattato in questa sede).

Sintesi delle procedure di calcolo del rischio individuale

La relazione di **Walls-Riley** modificata da **Fisk e Nazaroff**, ricavate nell'ipotesi di *ventilazione pienamente miscelata*, consente di calcolare il rischio da contagio.

Le relazioni di **Walls-Riley** sono:

$$P = \frac{C}{S} = \left(1 - e^{-\left(\frac{R_{masc} I q p t_{exp}}{Q + \lambda_{UV} V + Q_r \eta_r} \right)} \right) 100$$

$$R_{masc} = \left[100 - \left(X - \frac{X \cdot Y}{100} \right) \right] \%$$

Si ricordi che C_d è il **fattore di rimozione del contagio** e tiene conto sia del **numero di ricambi orari (Vol/h)** che dei **numeri equivalenti di ricambi aggiuntivi** per effetto dell'azione di:

- Filtro dell'aria nei terminali di impianto;
- Lampade U.V. (di tipo UVC) da inserire nei terminali o nei canali dell'aria;
- Mascherine di protezione individuale.

C_d tiene conto anche del deposito di aerosol sul terreno che equivale ad una rimozione dal bilancio di aerosol di contagio. Non si è tenuto conto del decadimento di vitalità dei droplet.

La relazione di **Gammaitoni – Nucci** modificata da **Fisk e Nazaroff**, ricavate nell'ipotesi di *ventilazione pienamente miscelata*, consente di calcolare il rischio da contagio.

Le relazioni di **Gammaitoni-Nucci** sono:

$$P = \left(1 - e^{-\frac{(p \cdot f_{masc}) q I}{V} \frac{C_d t + e^{-C_d t} - 1 - \left(\frac{C_d n_0}{q I} \right) e^{-C_d t} + \frac{C_d n_0}{q I}}{C_d^2}} \right) * 100$$

$$C_d = \lambda_{ventilazione} + \lambda_{filtrazione} \cdot \eta_{filtro} + \lambda_{UN} \cdot \eta_{UV} + \lambda_{deposito}$$

$$f_{masc} = \left[100 - \left(X - \frac{X \cdot Y}{100} \right) \right] \%$$

Calcolo del rischio da contagio individuale - Progetto

In fase di **Progetto** non conosciamo l'esatto valore dei **quanta/h** prodotti dall'**Infetto** all'interno dell'ambiente ma dobbiamo stimarlo in via preliminare. Si è visto, in base agli studi recenti (vedi **Buonanno**) che possiamo adottare i valori di **q indicati** nella seguente tabella, considerando sempre le **condizioni peggiori possibili per lo scenario considerato** all'interno dei valori consigliati:

q = 20-50	quanta/h	per attività scolastiche;
q = 70-100	quanta/h	per i casi di attività commerciali;
q = 200 e oltre	quanta/h	per i casi di attività fisica moderata.

Si ricordi che, come visto nella prima parte del seminario, la produzione dei **quanta/h** dipende molto dai seguenti fattori:

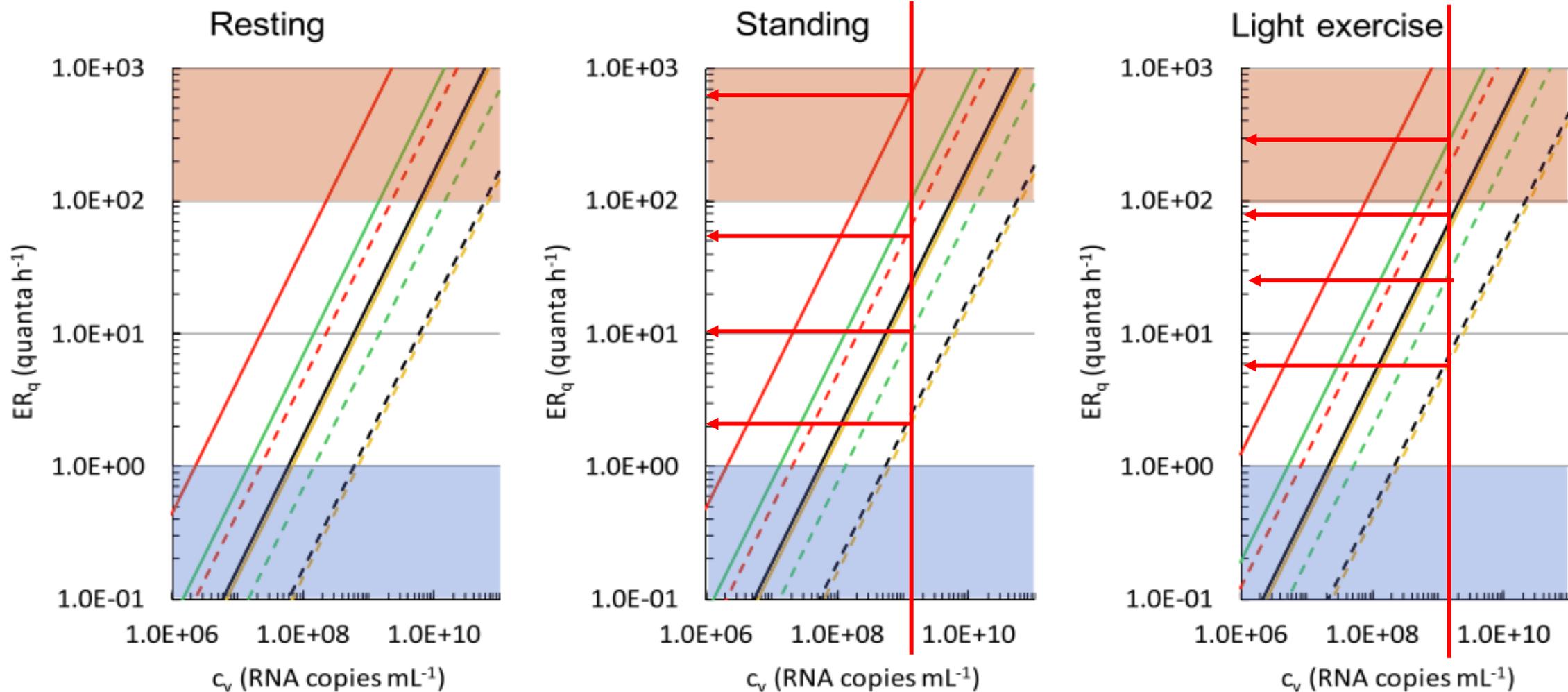
- **Attività svolta** (*a letto, in piedi, attività fisica leggera, attività fisica pesante*);
- **Tipo di parlato** (*sussurrato, parlato normale, parlato ad alta voce, parlato urlato*);
- **Tipo di emissione dei droplet** (*respirazione, parlato, tosse, starnuto*).

Infine, la **variabilità delle cariche virali** è notevole e dipende fortemente dalle **copie di RNA** presenti nelle goccioline organiche espulse. Il **numero di copie RNA** può variare da **10⁸** alla **10¹¹** e quindi con un ampio intervallo di indeterminazione.

Ai fini della verifica di progetto è opportuno considerare sempre le condizioni considerate **peggiori**, anche se più difficili da ottenere.

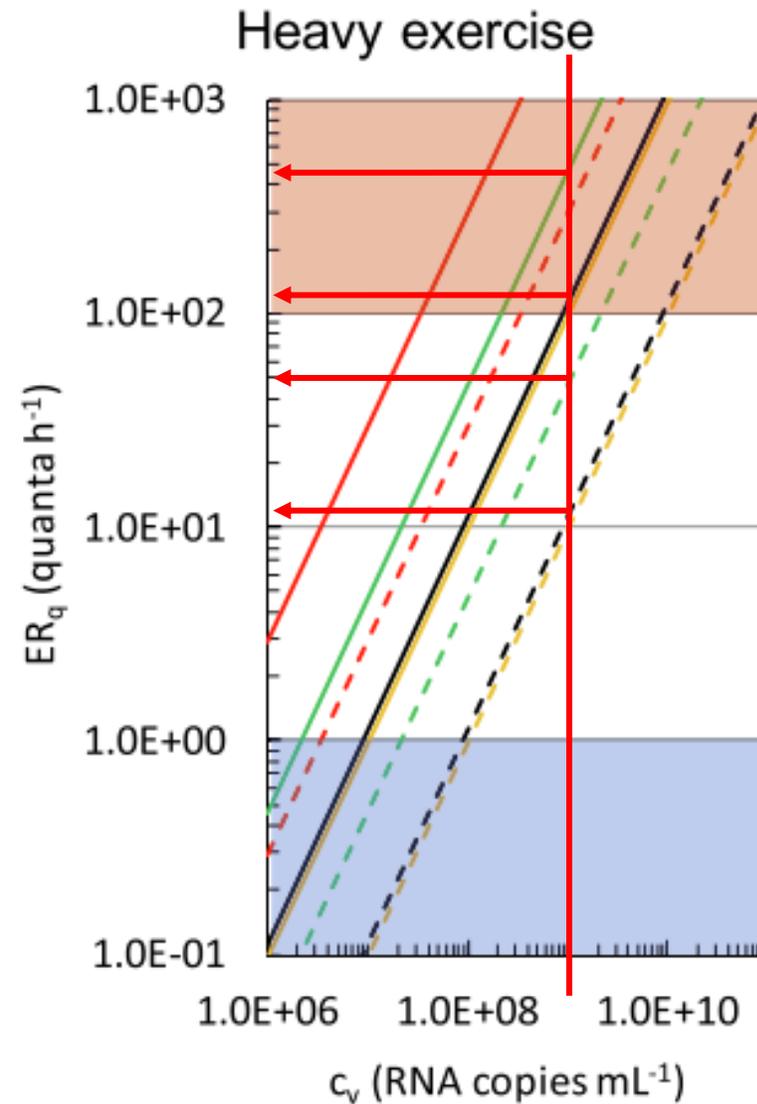
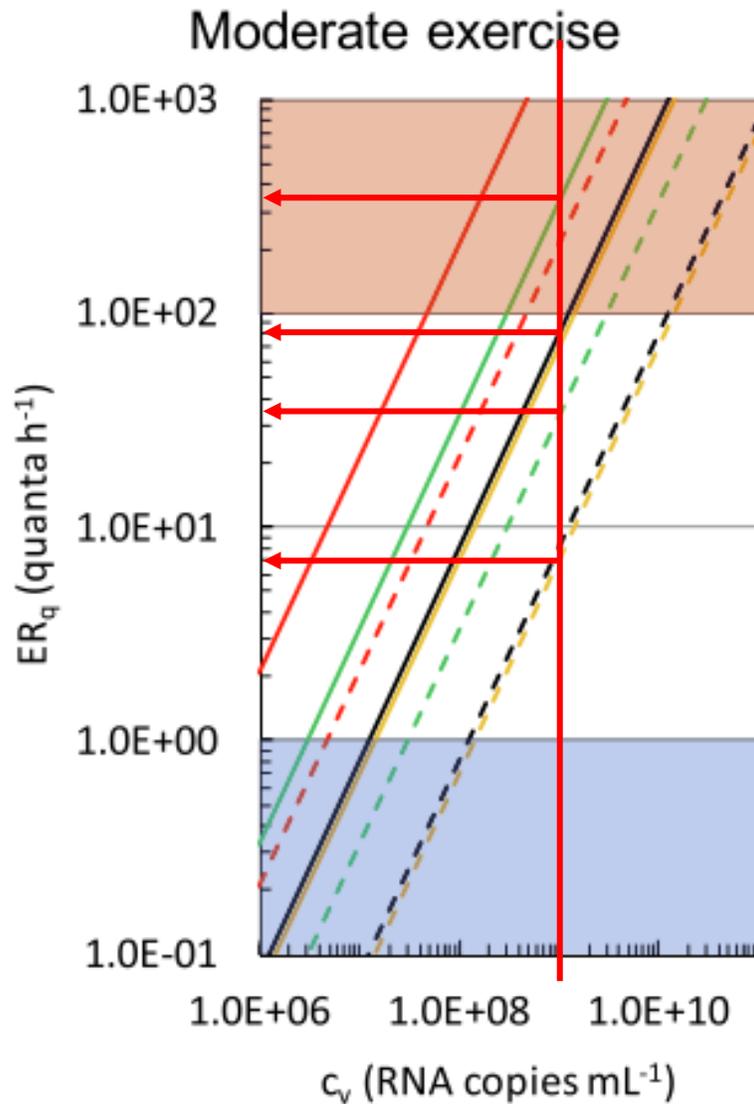
Calcolo del rischio da contagio - Progetto

Si riportano, per confronto, alcuni abachi dalla pubblicazione di **Buonanno et alii** per il calcolo dei quanta prodotti in funzione delle **copie virali RNA** e dell'attività svolta. Per date copie virali, stando in piedi, si possono avere **quanta/h** variabili da qualche unità a diverse centinaia.



Calcolo del rischio da contagio - Progetto

Altre possibili attività e legenda



Legend

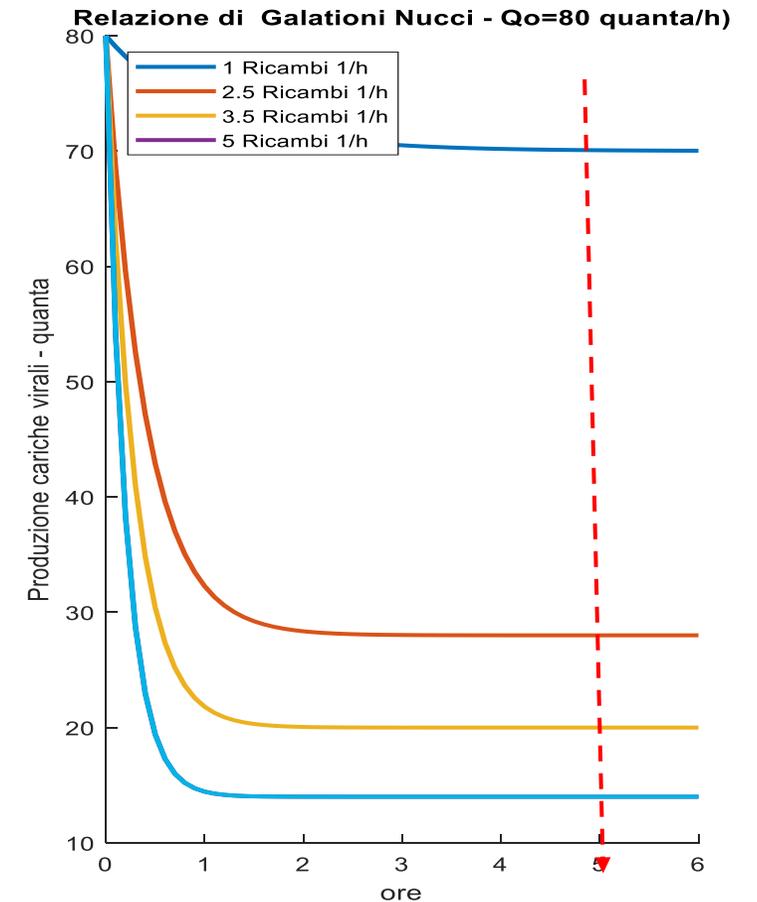
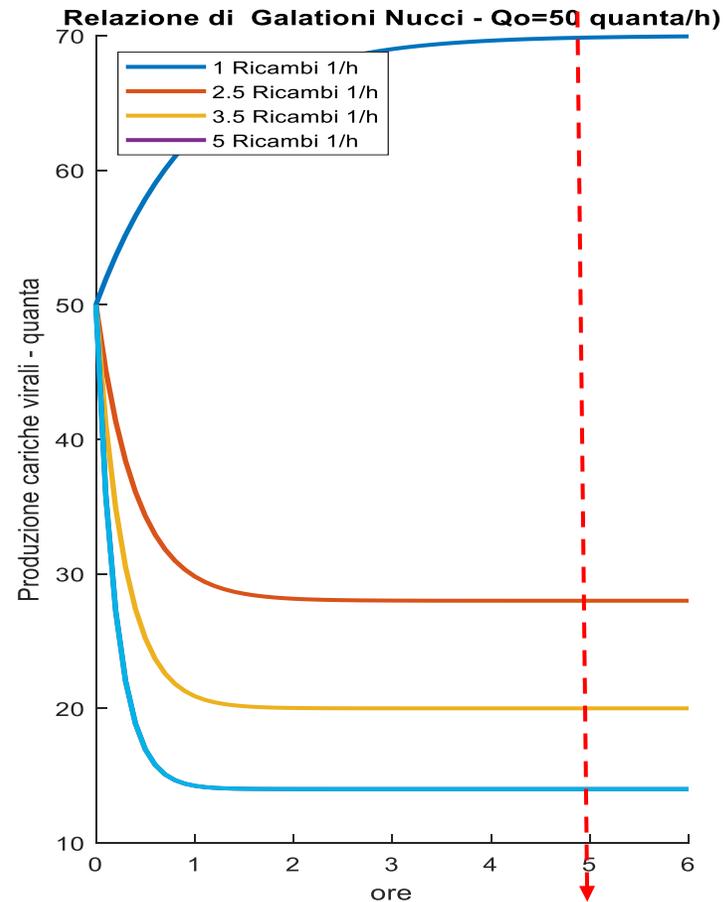
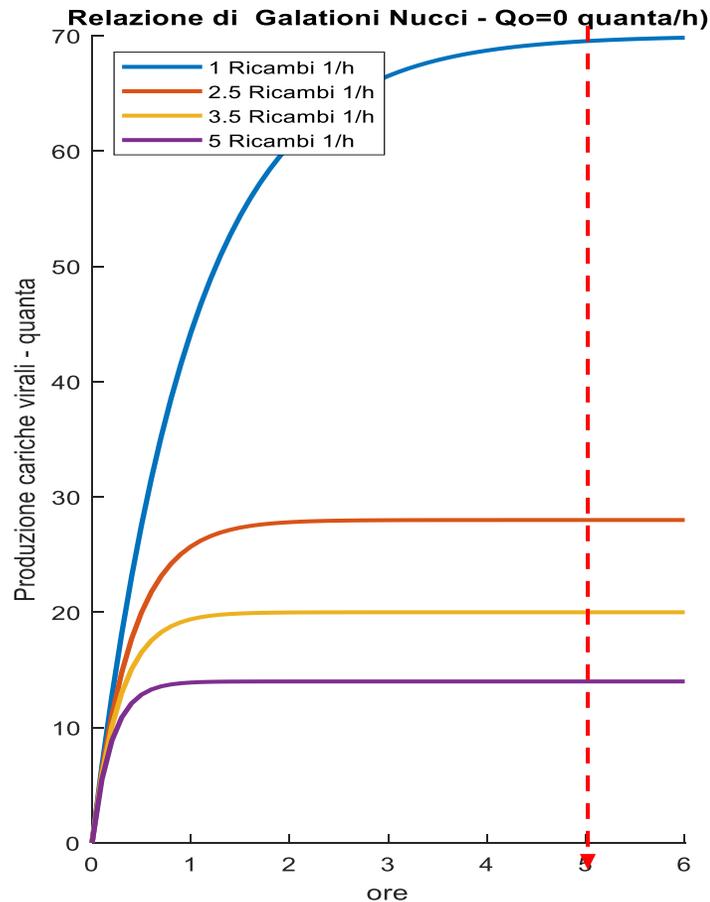
- - - voiced counting, c_i=0.01
- voiced counting, c_i=0.10
- - - whispering counting, c_i=0.01
- whispering counting, c_i=0.10
- - - unmodulated vocalization, c_i=0.01
- unmodulated vocalization, c_i=0.10
- - - breathing, c_i=0.01
- breathing, c_i=0.10

Relazione per la Produzione di cariche virali

La produzione di **cariche virali (quanta/h)**, funzione del numero di **infetti, I**, del numero di **rimozione dei contagi, C_d** , e al numero di **cariche iniziali, N_0** , è data dalla relazione (da **Buonanno et alii**):

$$N_R = \frac{q \cdot I}{C_d} + \left(N_0 - \frac{q \cdot I}{C_d} \right) \cdot e^{-n \cdot t}$$

Seguono esempi per vari valori di **N_0** e per prodotti **$q=70$ quanta/h** prodotti da **$I=1$ infetto**



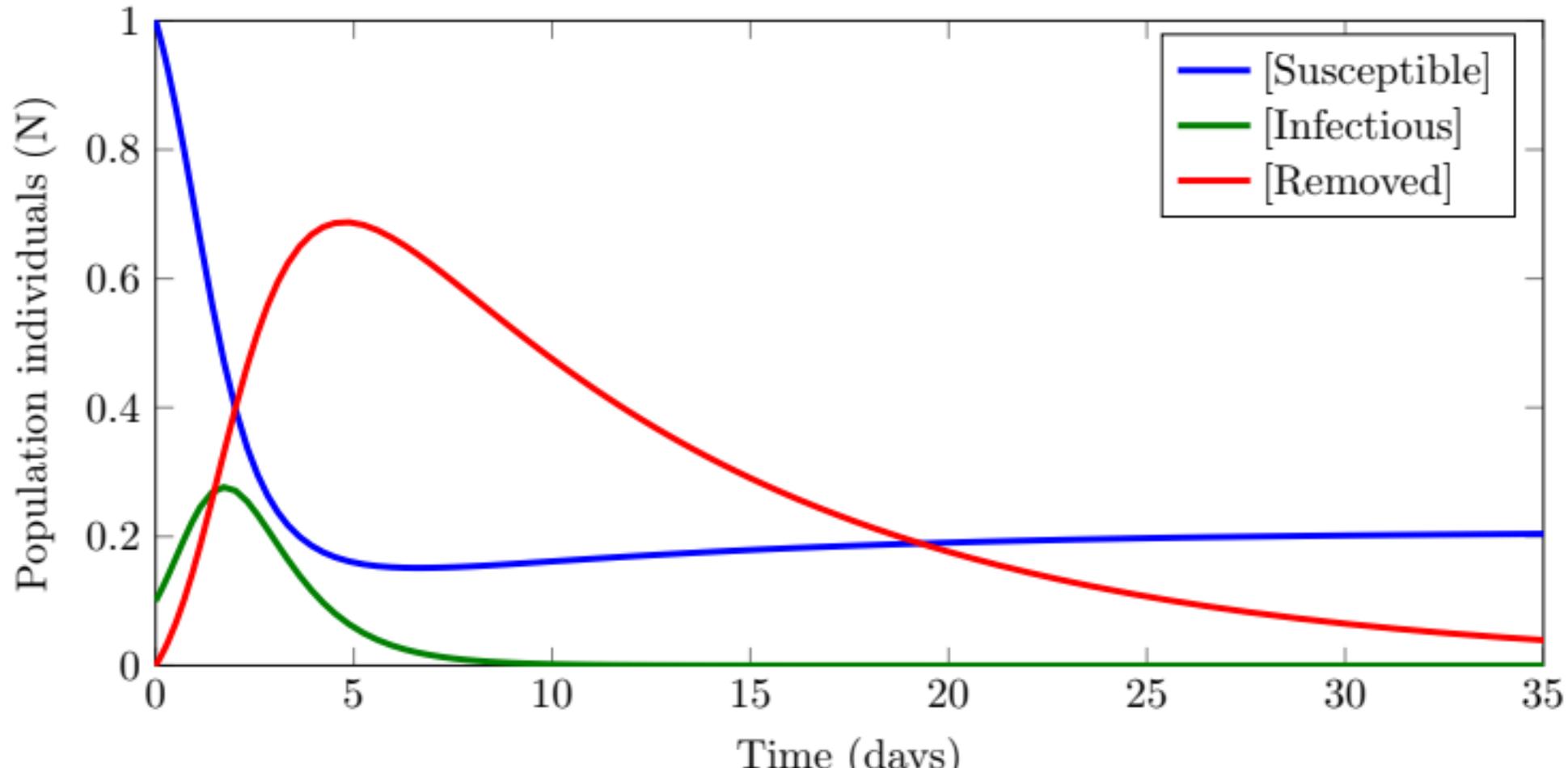
Calcolo del rischio da contagio - Progetto

Dall'esame delle relazioni prima esposte si possono derivare alcune considerazioni utili per le verifiche progettuali:

1. Il rischio **decrece** al **crescere del volume** dell'ambiente;
2. Il rischio **decrece** al **crescere del numero di ricambi orari di aria fresca**;
3. Il rischio **decrece** al **crescere dell'utilizzo delle protezioni impiantistiche e passive**, *in* particolare con **l'utilizzo di filtri per l'aria ricircolata, l'utilizzo dei raggi UV e l'uso dei dispositivi di protezione individuale (mascherine)**.
4. Il rischio **decrece** al **riducendo la produzione dei quanta**, quindi ***parlando poco e bassa voce, non svolgendo attività fisica che aumenti l'attività polmonare***;
5. Il rischio **decrece** al **decrescere del tempo di permanenza** nell'ambiente.
6. E' **da preferire la ventilazione meccanica** a quella naturale perché quest'ultima è poco affidabile e dipende fortemente dalle condizioni atmosferiche esterne. Inoltre, in inverno è poco praticabile poiché la temperatura dell'aria esterna è bassa.

Andamento dei Suscettibili, Infettivi e Rimossi (Modello SIR)

Oltre il modello **SI** (**S**usceptible, **I**nfectious) vi è il modello **SIR** (**S**usceptible **I**nfectious **R**emoved) consente di calcolare la **dinamica temporale dell'epidemia** per le **tre categorie di persone**, per una popolazione **N**, come indicato nella figura seguente per un caso generico. Si osserva che si ha un picco degli infettivi intorno a 2 ore ed un picco dei rimossi a circa 5 ore mentre i suscettibili decrescono fino a circa 4 ore e poi risalgono lentamente. Le curve dipendono dal valore dell'indice di riproduzione R_0 supposto pari a 2.133 nell'esempio.



Esempi di calcolo di progetto del rischio da contagio

Seguono **tre casi esempi** di applicazione delle regole di verifica progettuale dianzi esposti.

1. Un **supermercato** da **1080 m³** dotato di impianto HVAC con ventilazione primaria, filtri dell'aria e mascherine;
2. Una **sala da conferenza** da **360 m³**, con **60 posti a sedere**, dotato di impianto a fan coil senza aria primaria, senza filtri né lampade U.V. e con l'ipotesi di utilizzo di mascherine protettive;
3. Un'**aula scolastica** per **scuola elementare** da **64 m²** e **224 m³**, con **21 posti** a sedere (compreso docente), con impianto a ventilazione naturale, fan coil di vecchio tipo (senza filtri e lampade U.V) e mascherine.

Negli abachi seguenti si possono leggere:

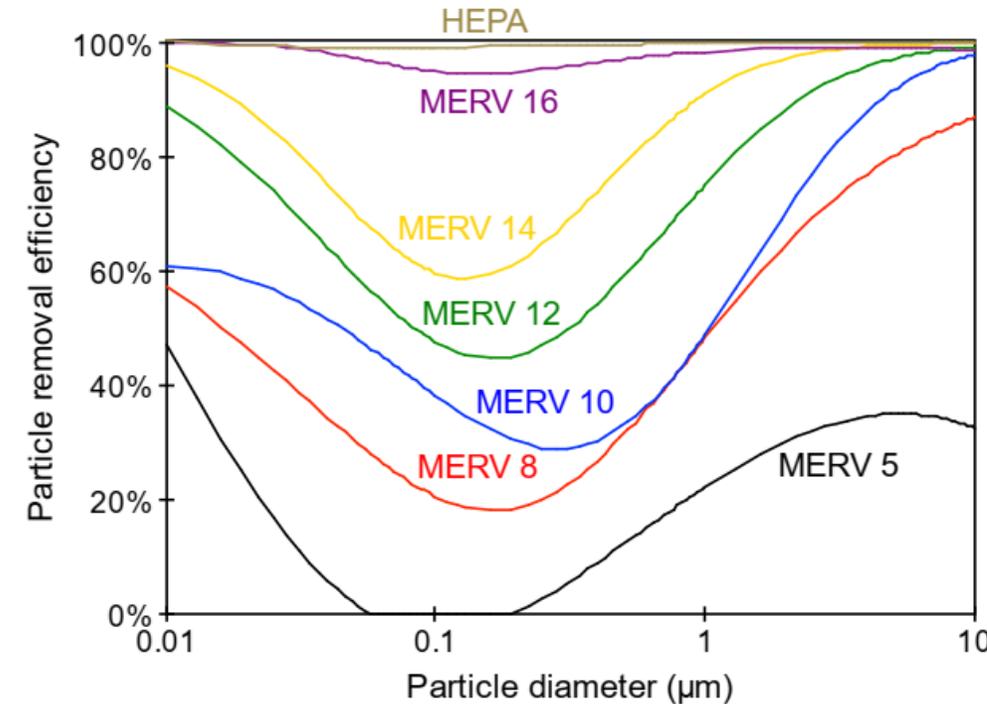
- La **percentuale di rischio personale** (%) per vari valore di **quanta/h** e numero di ricami orari;
- Il **rischio globale**, R_0 , dato dal prodotto del rischio individuale per il numero dei suscettibili meno 1 (che è l'infetto) per le stesse ipotesi indicate per il rischio individuale;
- L'andamento dei **quanta/h** al variare del tempo e dei **quanta/h** considerati negli abachi superiori.

Alcune linee in rosso indicano i tempi considerati limite per la permanenza nel supermercato, nella sala conferenza e nell'aula scolastica.

Classe dei filtri secondo la EN 779 2012 e l'ASHRAE

I filtri sono classificati dalla **EN 779 2012** e l'**ASHRAE** secondo le tabelle seguenti.

EN 779 2012	EN ISO 16890			
Filter Class	Coarse	ePM10	ePM2,5	ePM1
G1	---	---	---	---
G2	30% - 50%	---	---	---
G3	45% - 65%	---	---	---
G4	60% - 85%	---	---	---
M5	80% - 95%	40% - 70%	10% - 45%	5% - 35%
M6	> 90%	60% - 80%	20% - 50%	10% - 40%
F7	> 95%	80% - 90%	65% - 75%	40% - 65%
F8	> 95%	90% - 100%	75% - 95%	65% - 90%
F9	> 95%	90% - 100%	85% - 95%	80% - 90%



MERV	Droplet nuclei removal efficiency (η_{filter})	Assumed filter removal rate ($\lambda_{\text{recirculated}} \times \eta_{\text{filter}}$, 1/hr)
4	11%	0.17
7	44%	0.67
11	72%	1.09
13	87%	1.32
14	89%	1.35
15	90%	1.37
16	95%	1.45
HEPA	99.9%	1.52

Azioni per la riduzione del rischio di contagio

Si è utilizzata la relazione di **Gammaitoni – Nucci** è del **1997** perché più recente della relazione di **Walls- Riley (1958)** e perché considera la variabilità temporale dei quanta (valore medio temporale). Inoltre, parte da considerazioni analitiche più approfondite e consente di prendere in considerazione eventuali sorgenti virali (**quanta**) già presenti all'interno dei locali.

Nella prossima pagina si riportano le simulazioni con le due relazioni per i seguenti casi:

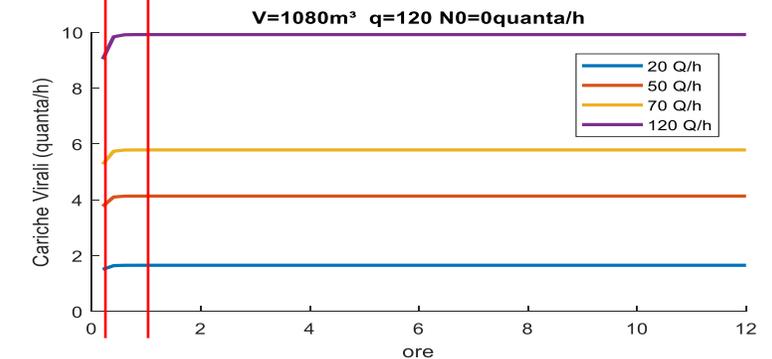
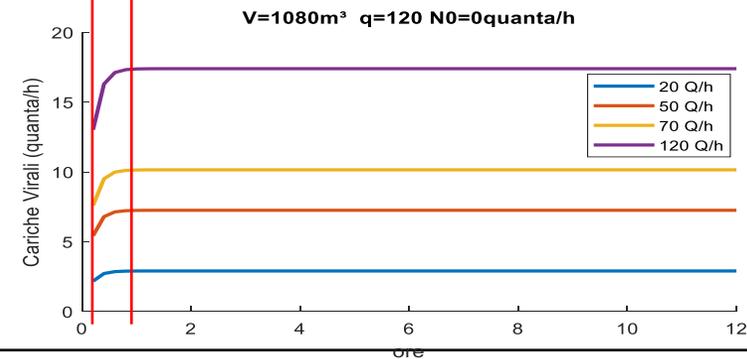
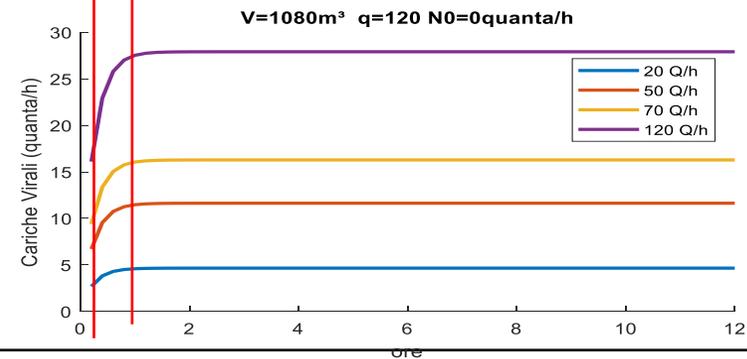
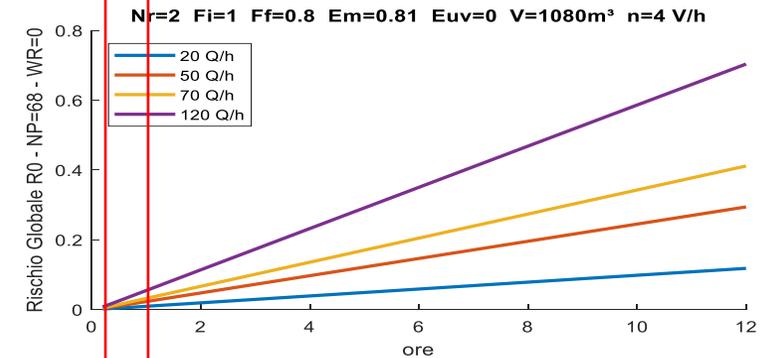
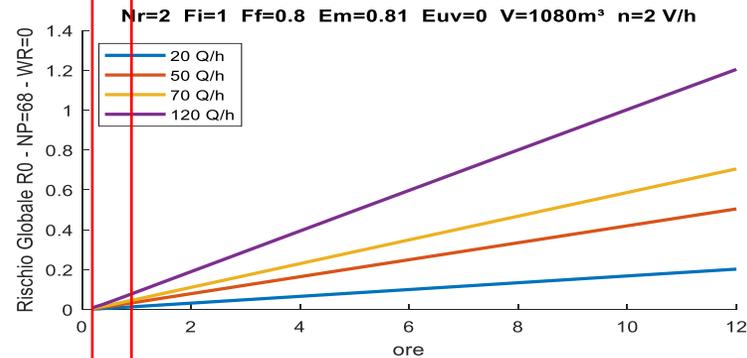
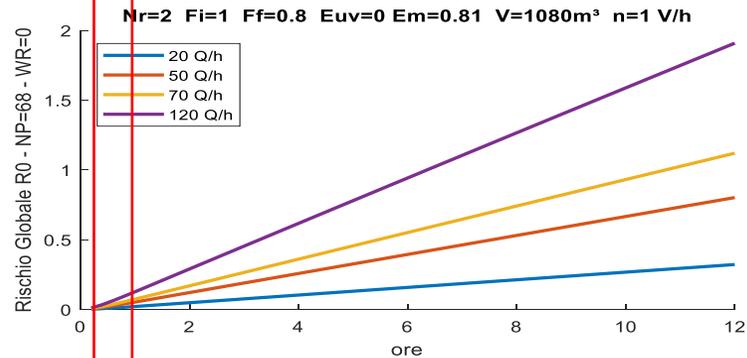
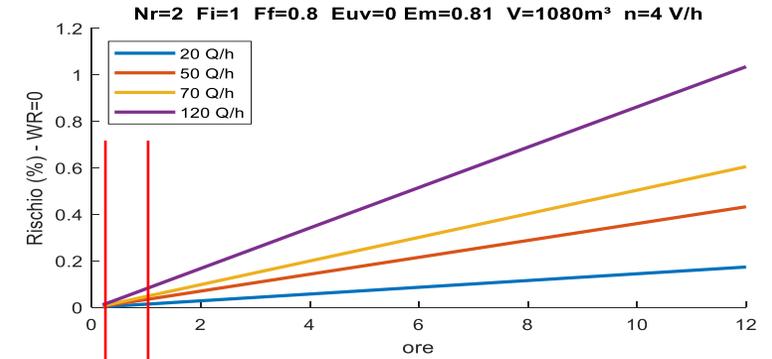
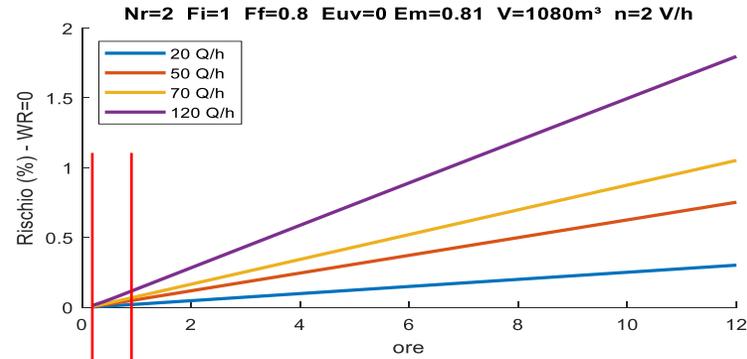
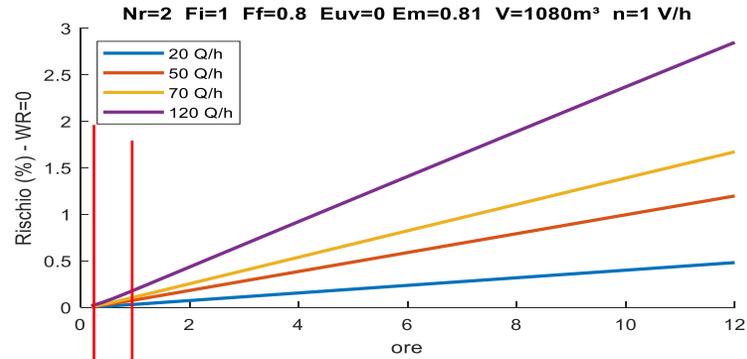
- *Numero di ricambi orari variabili da **2.5** a **3.5** e **5**. Sono i ricambi richiesti del **D.M. del 1975** per le scuole materne ed elementari, scuole medie, Licei e università;*
- *In tutte le simulazioni è considerato un tasso di deposizione medio pari a **1.7** (1/h);*
- *Nel primo riquadro si ha la probabilità di contagio al variare del solo numero di ricambi orari di aria esterna;*
- *Nel secondo riquadro si ha una portata di ricircolo pari al **50%** di quella esterna, con impianto funzionante 24 h/g e con efficienza di filtrazione $\eta_F = \mathbf{99.99\%}$;*
- *Nel terzo riquadro si ha, oltre al ricircolo e filtrazione, anche l'utilizzo dei dispositivi di protezione individuali, DPI, e in particolare di mascherine con efficienza di rimozione dell'**80%**.*

In ciascun riquadro si evidenziano due zone caratteristiche (con riferimento alle aule scolastiche):

- **Rischio di contagio fino a 5 ore** di permanenza;
- **Rischio di contagio fino a 10 ore** di permanenza.

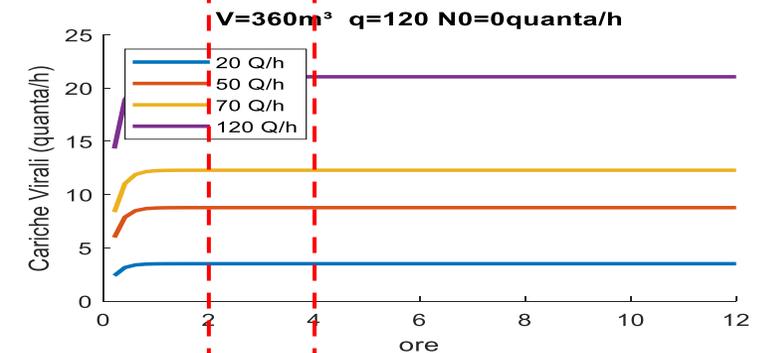
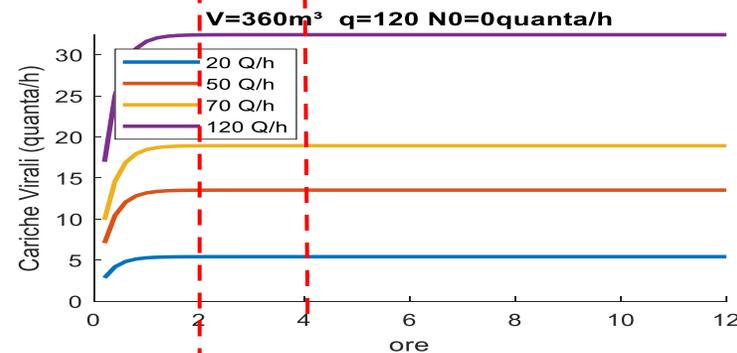
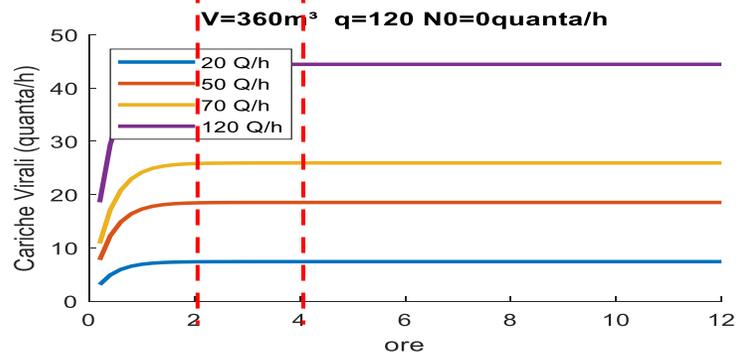
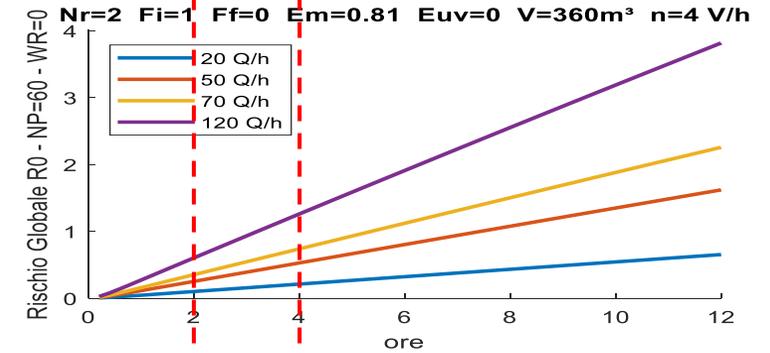
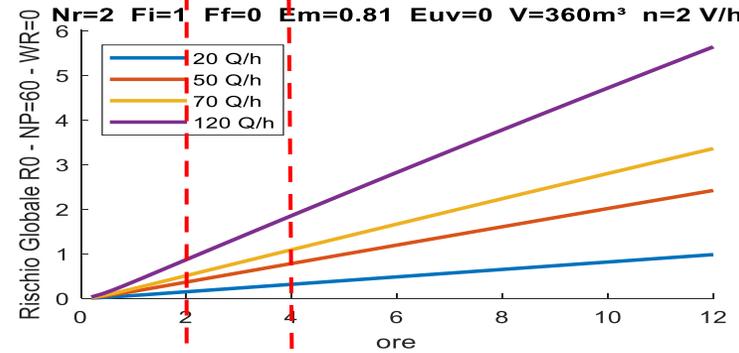
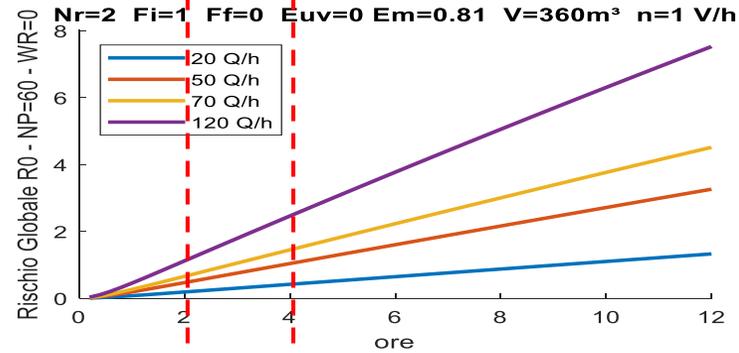
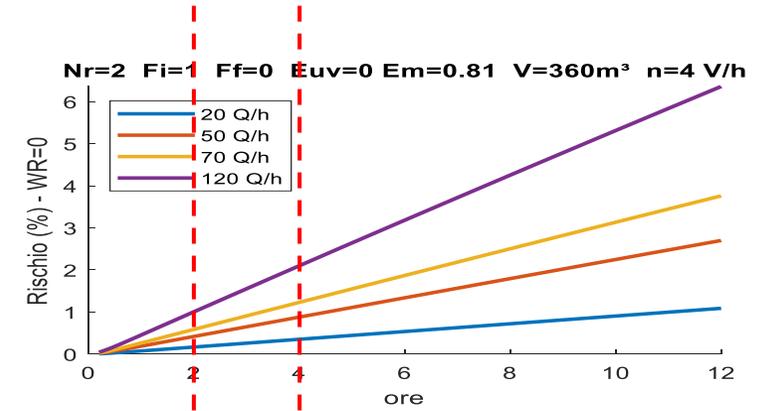
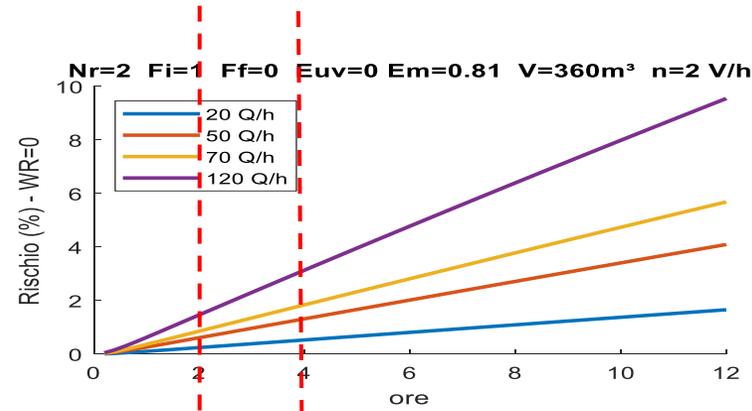
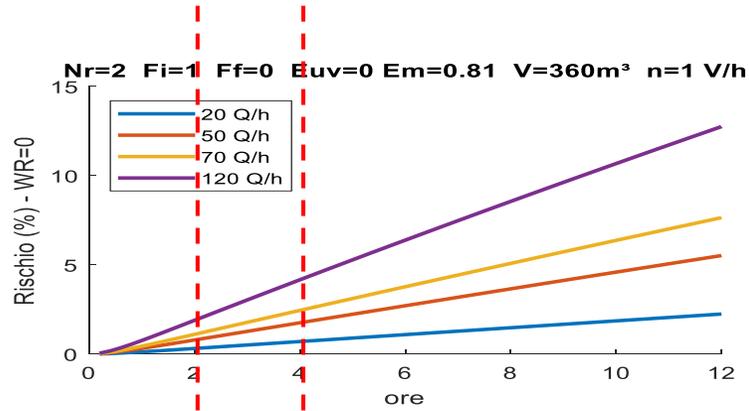
Rischio e produzione dei quanta in un supermercato

Si riporta un esempio per un supermercato con $V=1080 \text{ m}^3$ con impianto HVAC, $n_r=2$, filtri e mascherine in varie ipotesi di calcolo.



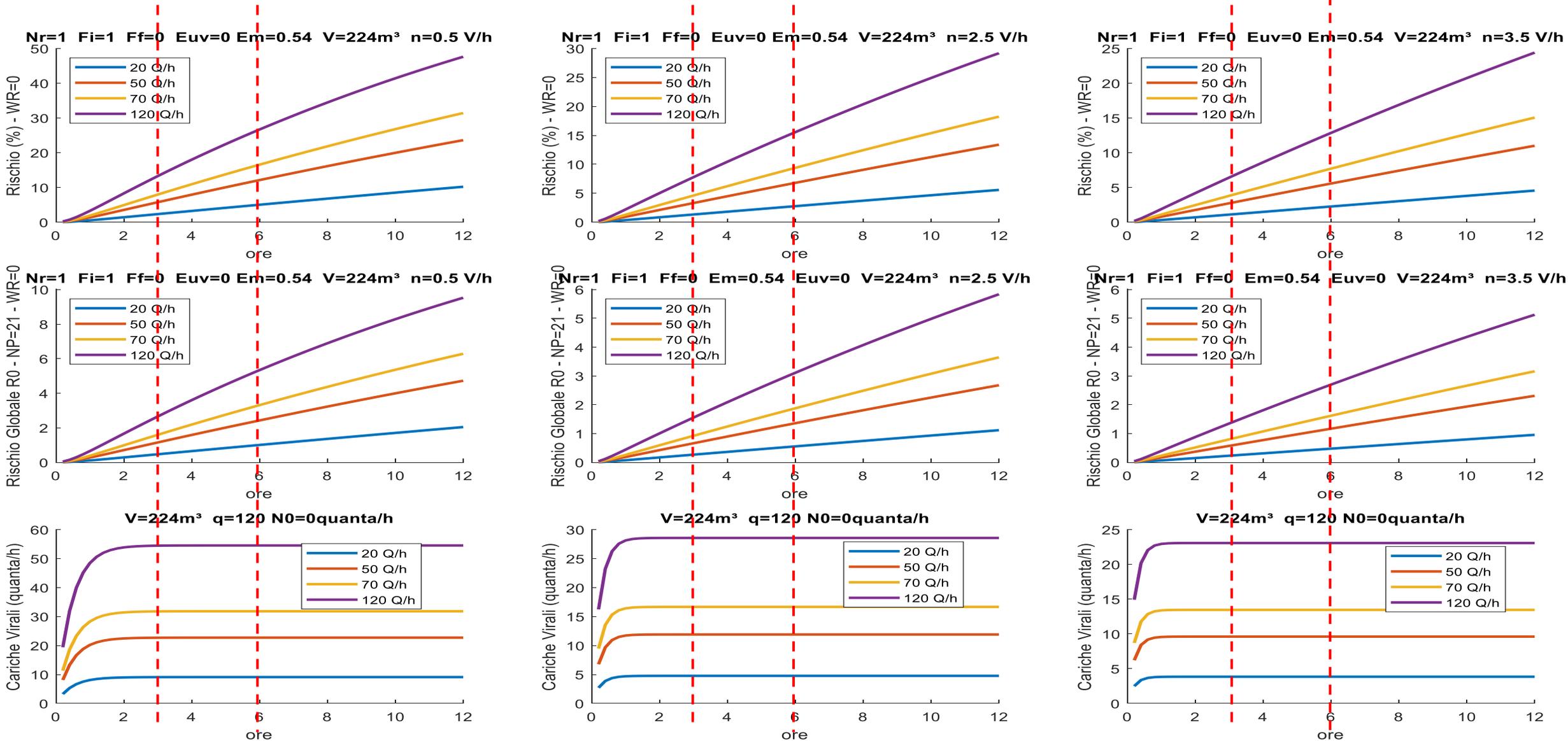
Rischio e produzione dei quanta in una sala conferenze

Sala conferenze con $V=360 \text{ m}^3$ con impianto HVAC, $n_r=2$, mascherine.



Rischio e produzione dei quanta in un'aula scolastica

Aula scolastica con $V=224 \text{ m}^3$, 21 posti, fan coil, $n_r=1$, ventilazione naturale e mascherine



Calcolo dei quanta/h noti i Suscettibili e gli infetti

Dalla teoria di **Gammaitoni – Nucci**, più volte vista in precedenza, si ha che la probabilità di rischio individuale è data dalla relazione:

$$P(t, q, C_d) = \left(1 - \frac{S(t, q, C_d)}{S_0} \right) \cdot 100 = \frac{I}{S} = \left(1 - e^{-\frac{pqI}{V} \frac{C_d t + e^{-C_d t} - 1}{C_d^2}} \right) * 100$$

Noti **I (Infetti)** ed **S (Suscettibili)** è possibile calcolare i **quanta/h** che sono stati prodotti per avere il rapporto **I/S**:

$$q = \frac{V}{p} \frac{C_d^2}{C_d t + e^{-C_d t} - 1} \log \frac{S_0}{S}$$

Vale il simbolismo già indicato in precedenza. Si osservi che se **C_d** non coincide con il numero di ricambi orari occorre apportare le dovute correzioni per ottenere il corretto valore dei **quanta/h**.

Procedendo a ritroso si può, quindi, calcolare la produzione oraria della carica infettiva, **q (quanta/h)** in modo da potere effettuare le **analisi eziologiche** sul tipo di contagio che si è verificato (se di breve distanza tramite droplet o di **lunga distanza** tramite aerosol).

Quest'analisi risulta utile per esaminare casi di contagio già avvenuti e studiare le cause del contagio a posteriori.

CONFRONTO FRA I TRE METODI DI CALCOLO DELLA PROBABILITÀ DI CONTAGIO

Confronto fra i tre metodi di calcolo

Si sono esaminati approfonditamente i due metodi di calcolo della probabilità di contagio:

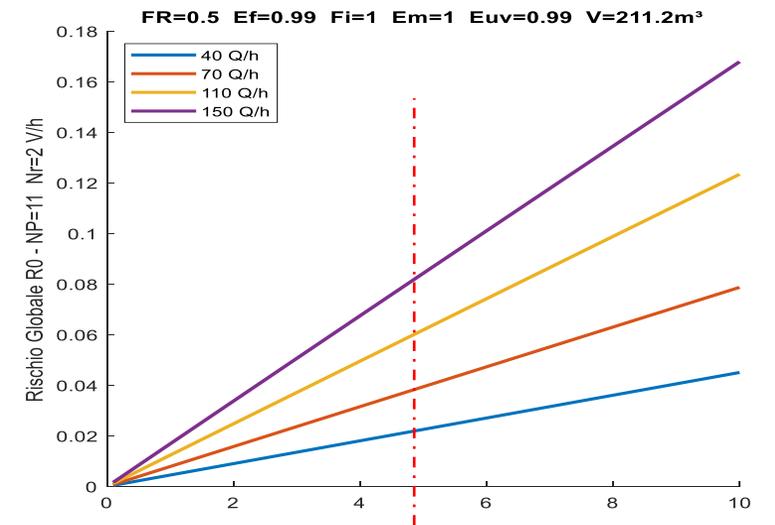
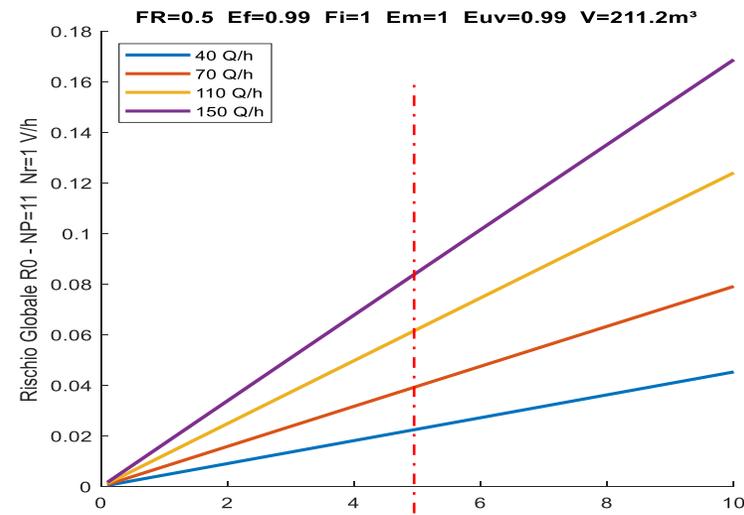
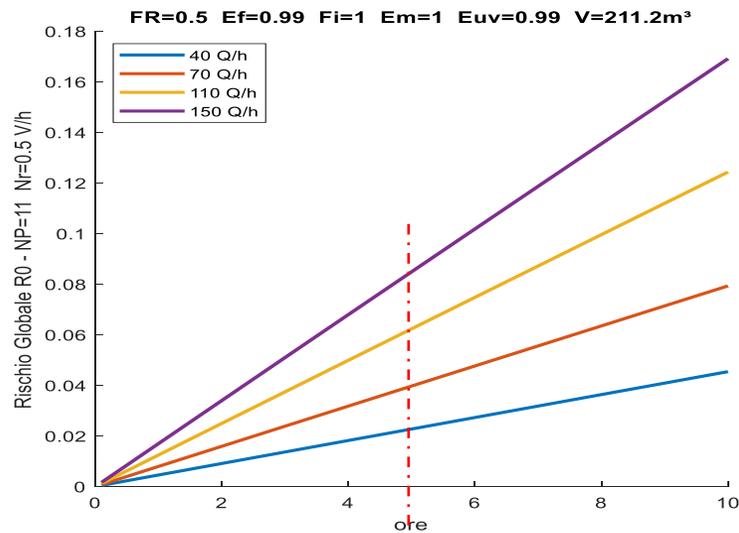
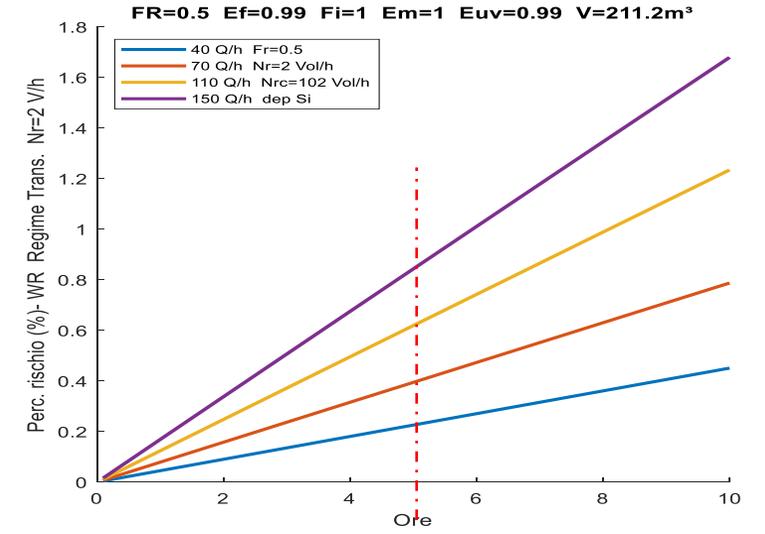
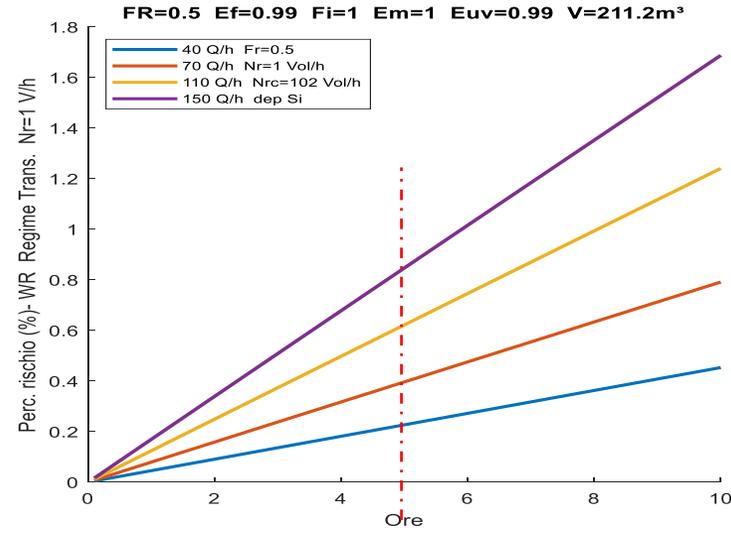
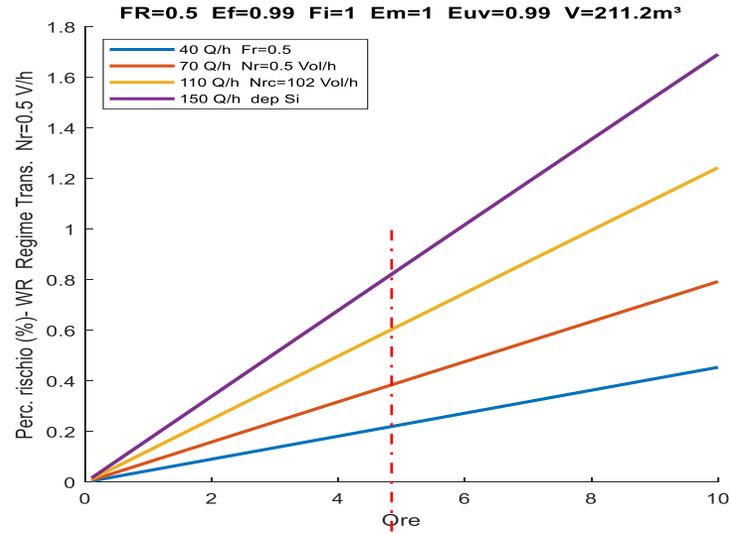
1. Metodo di **Walls-Riley**;
2. Metodo di **Gammaitoni-Nucci**;

Si sono evidenziate le caratteristiche e le peculiarità di ciascun metodo. Vogliamo adesso metterli a confronto su un caso esempio: un'aula scolastica per scuola elementare da **211** m³.

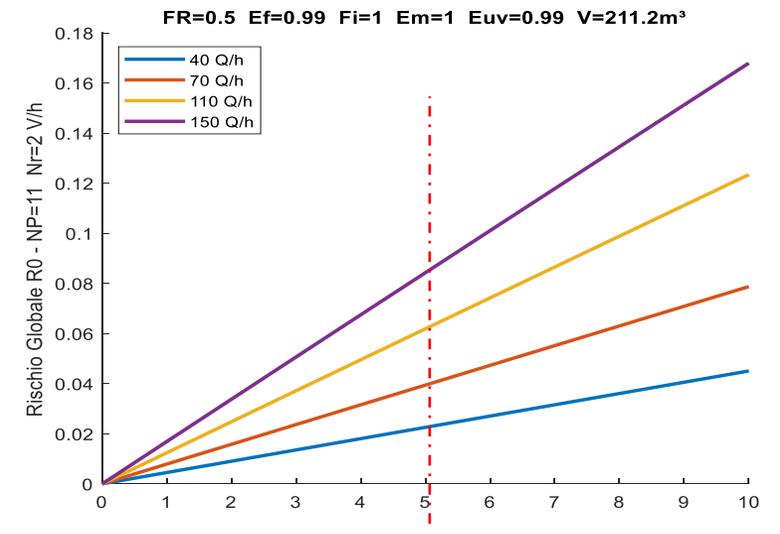
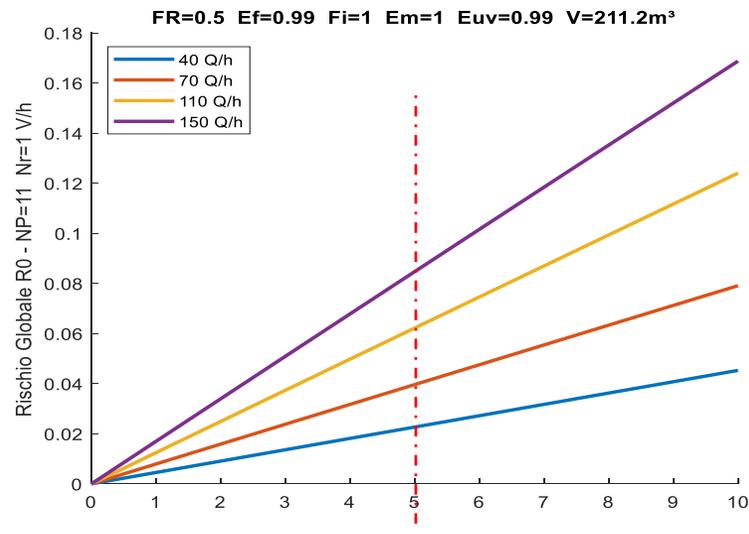
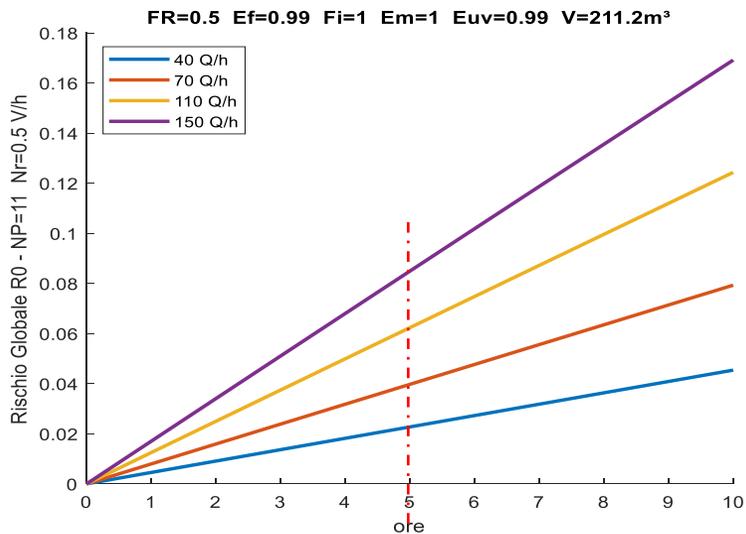
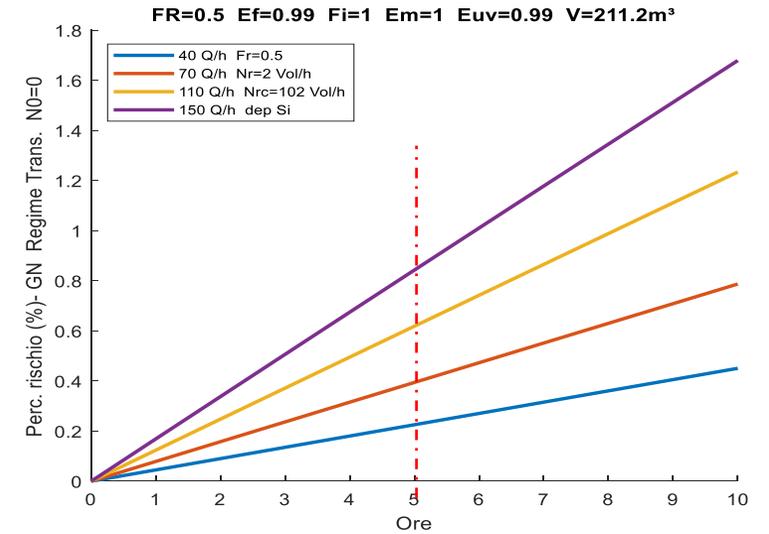
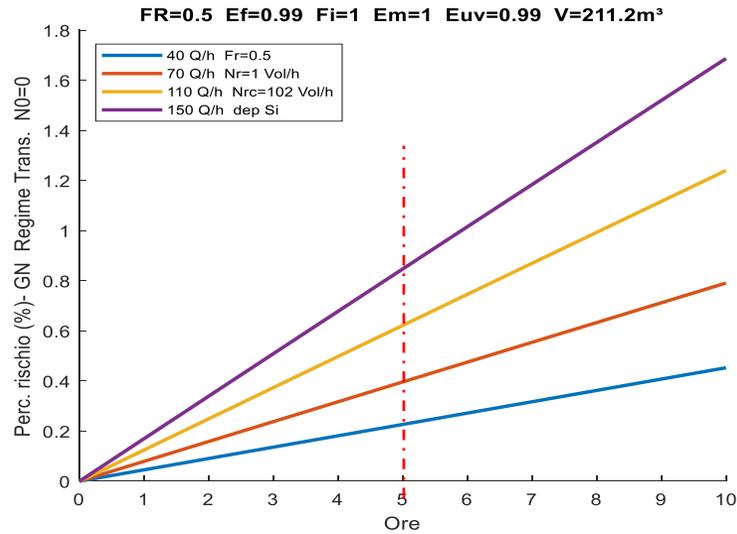
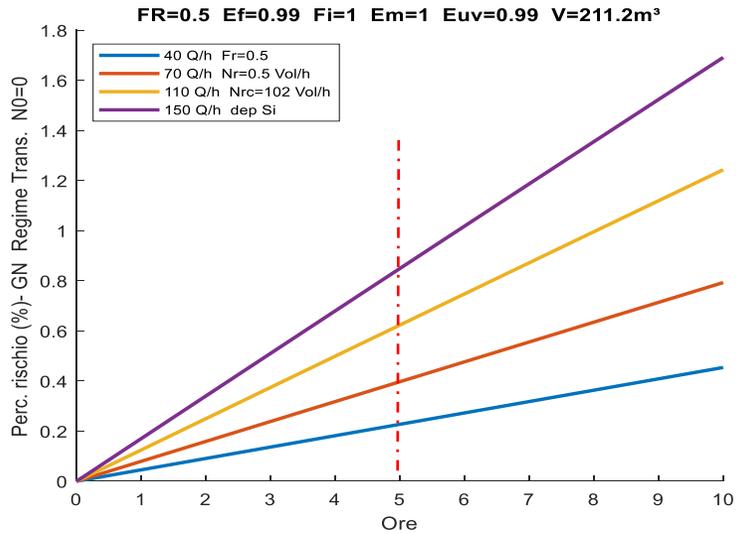
Si utilizzeranno le versioni più complete comprendenti le modifiche di **Fisk-Nazaroff** e si prenderanno in esame le versioni che possono tenere conto di condizioni variabili e non solo stazionarie.

Si porranno le stesse condizioni di calcolo (V , N_p , E_f , E_m , E_{uv} , $E_{deposito}$, N_r) in modo da evidenziare meglio le differenze nei risultati di calcolo.

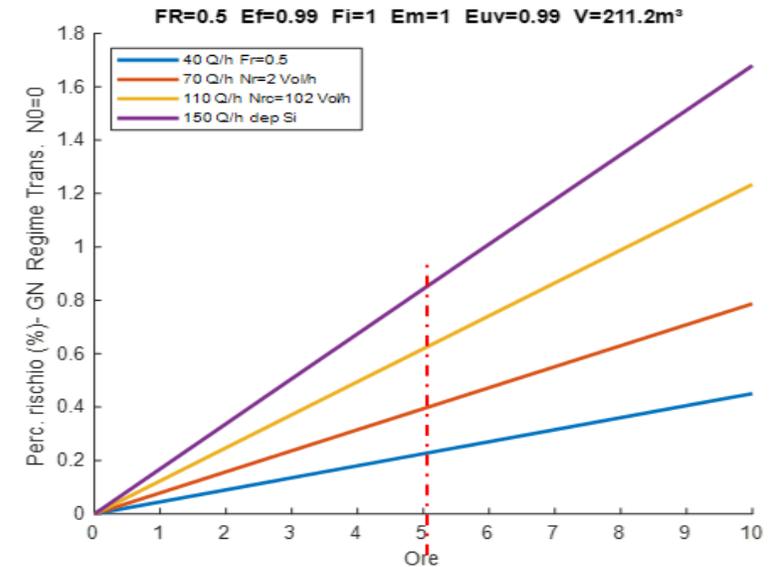
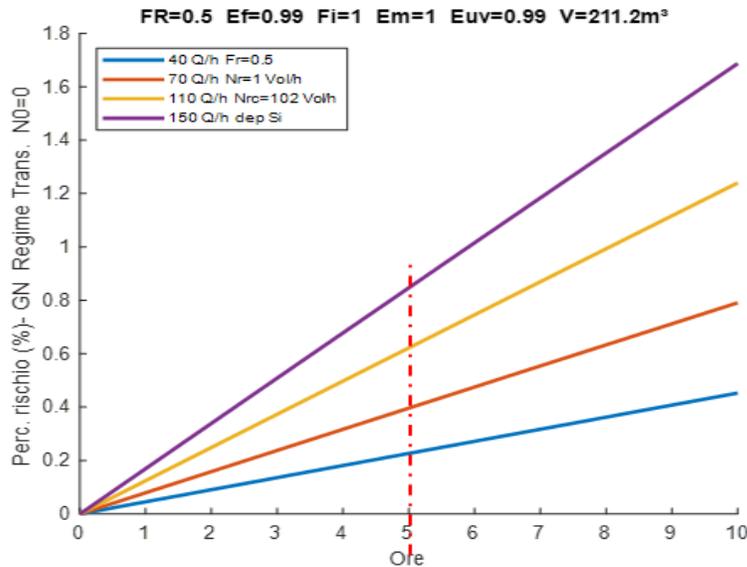
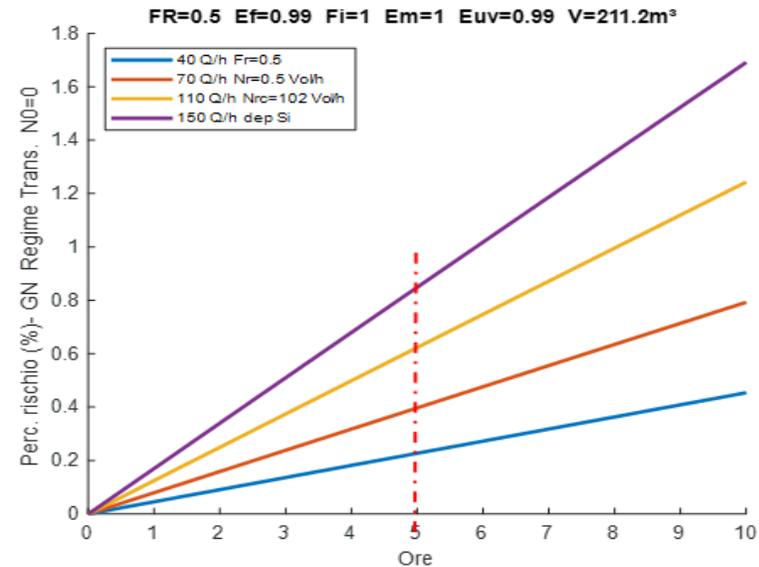
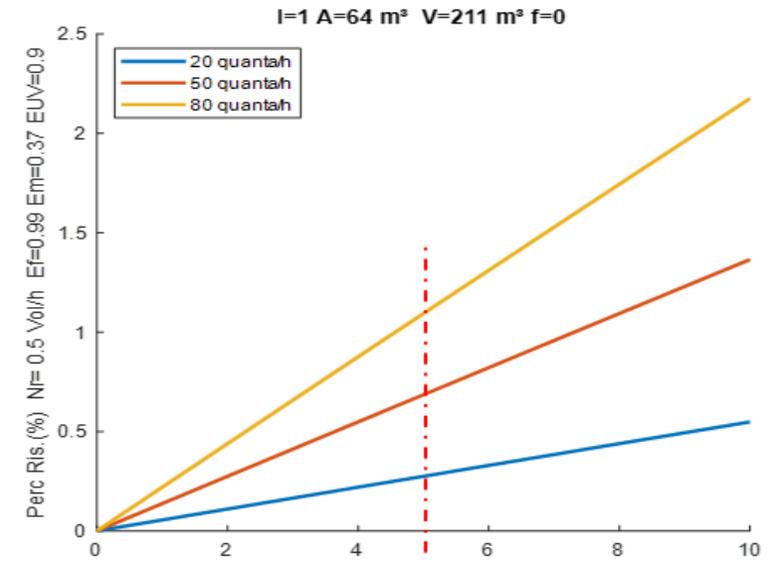
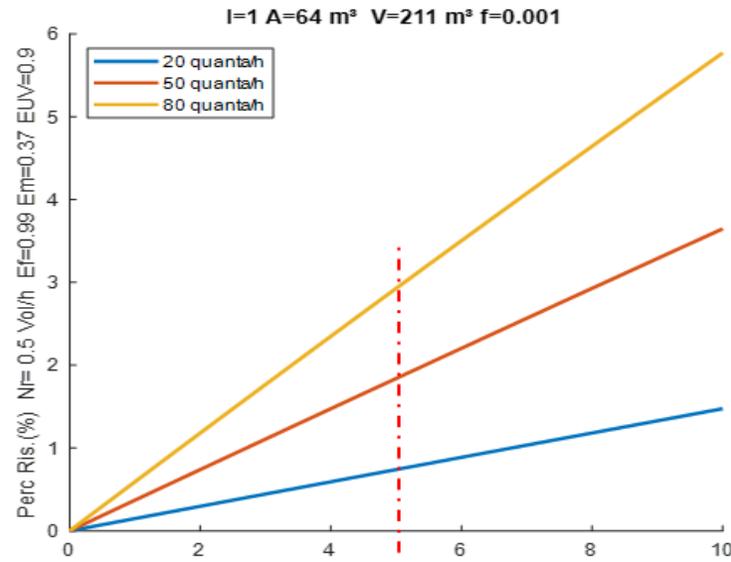
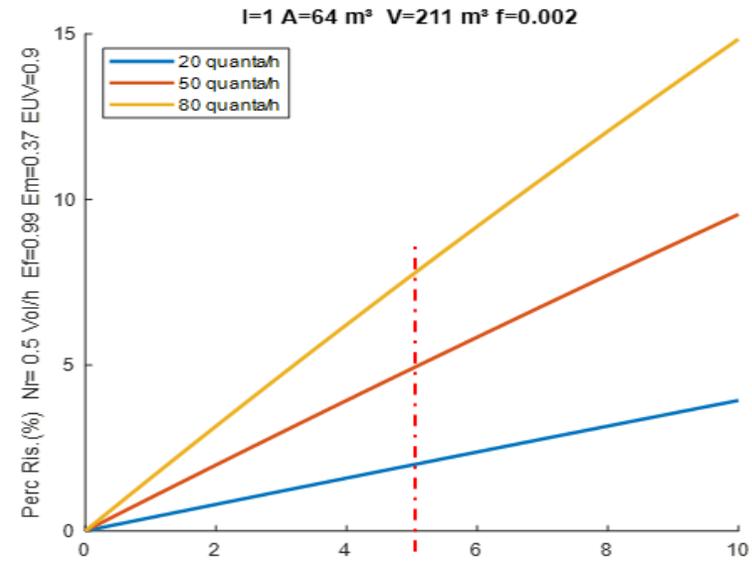
Confronto fra i tre metodi di calcolo – Walls-Riley



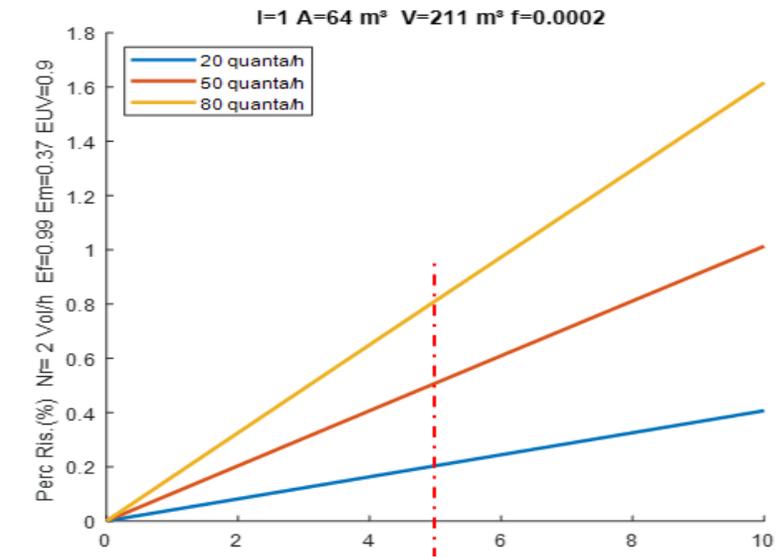
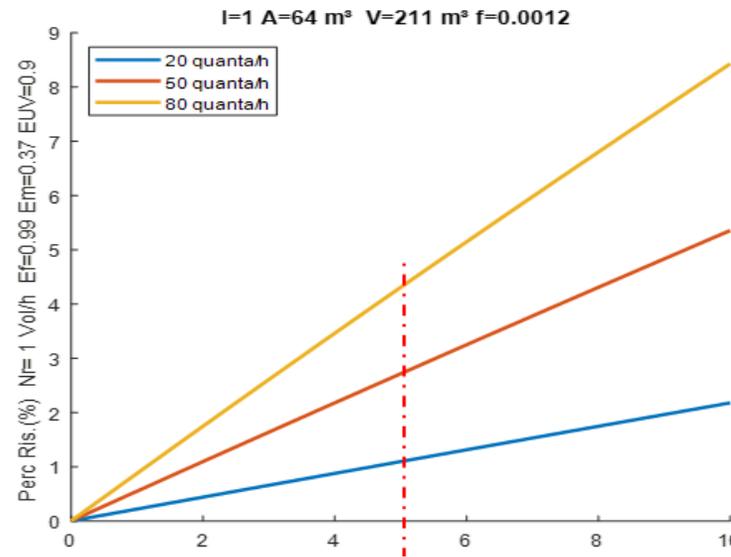
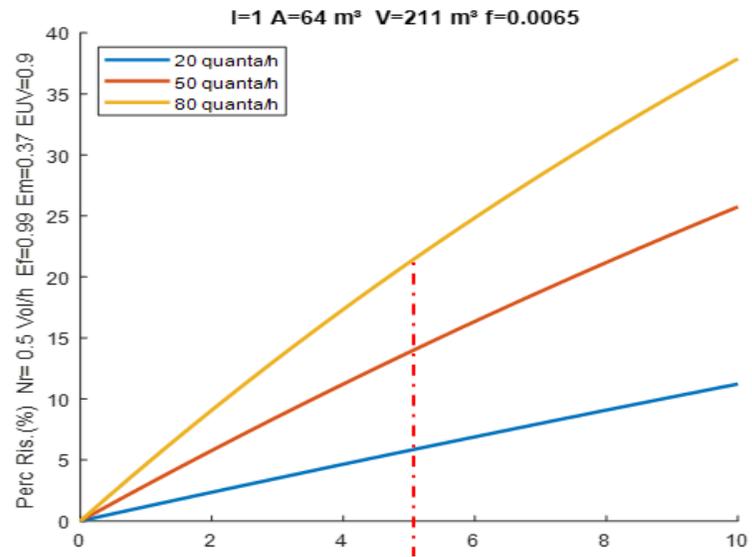
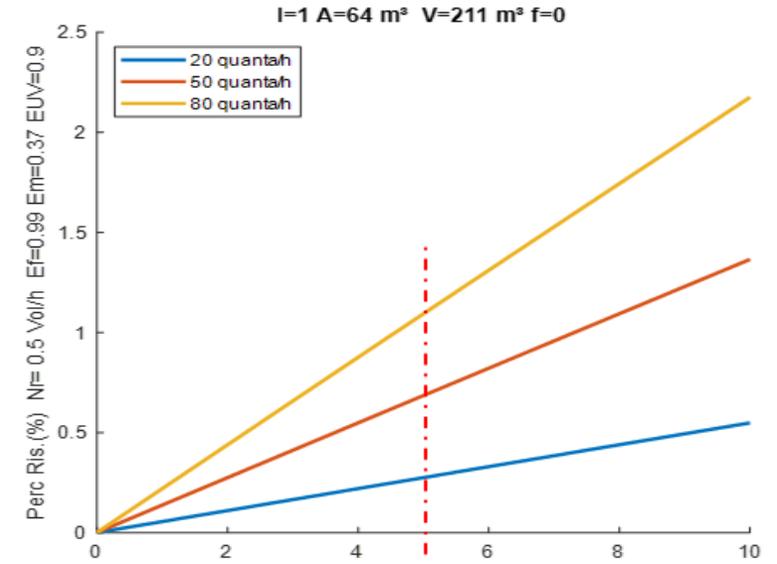
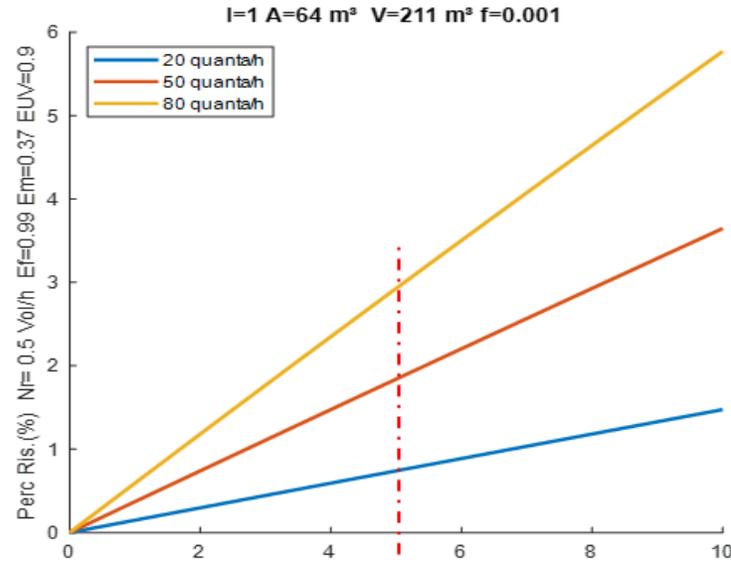
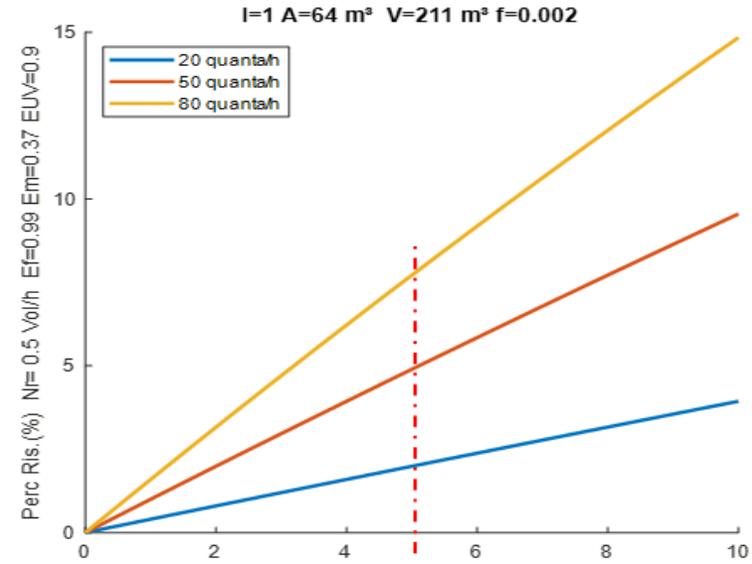
Confronto fra i tre metodi di calcolo – Gammaitoni-Nucci



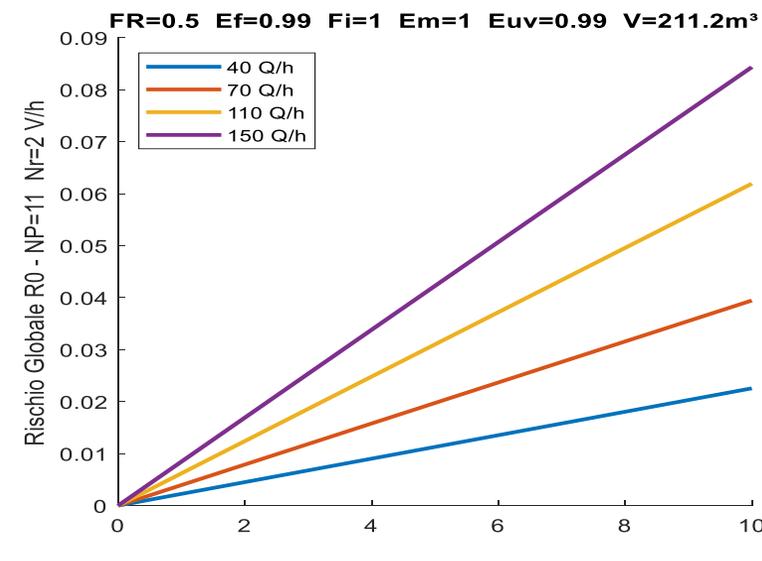
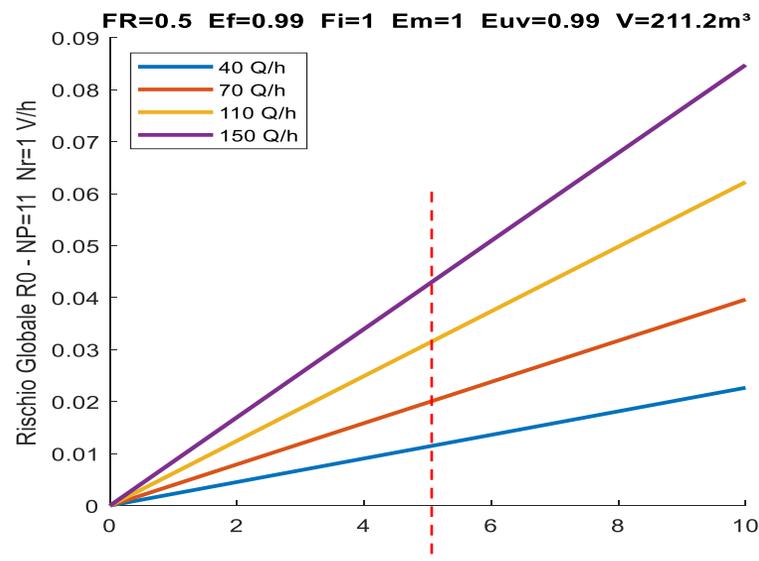
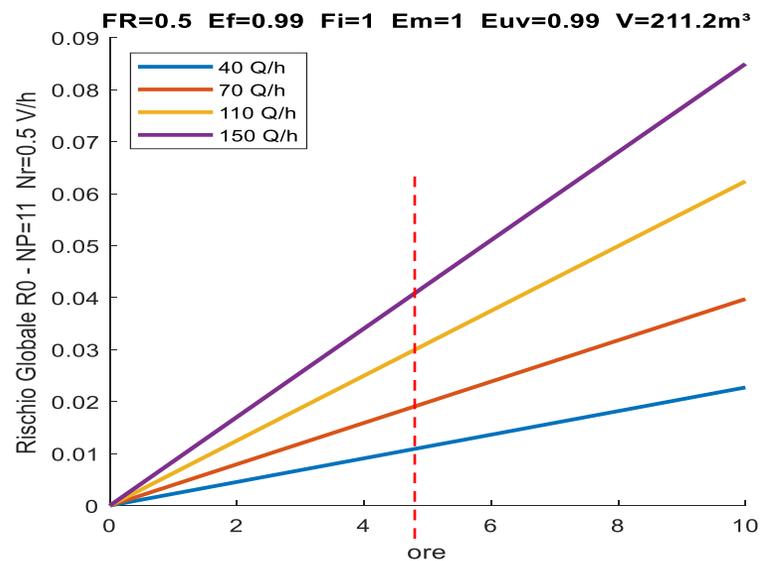
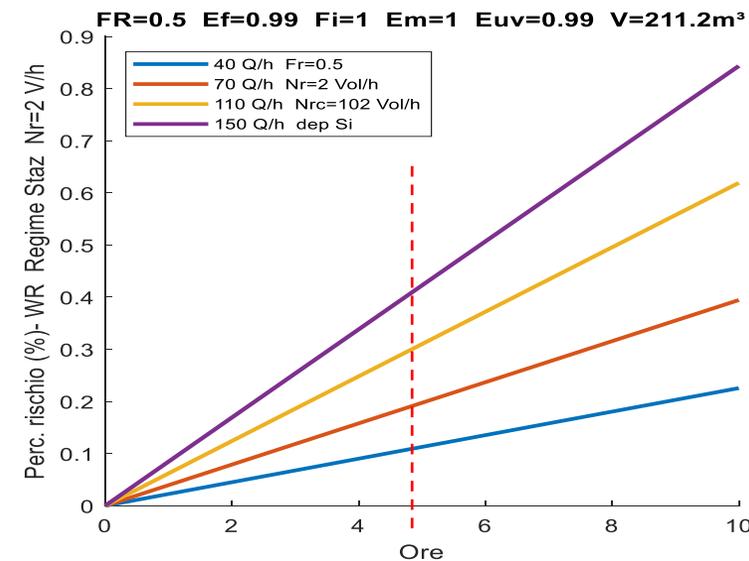
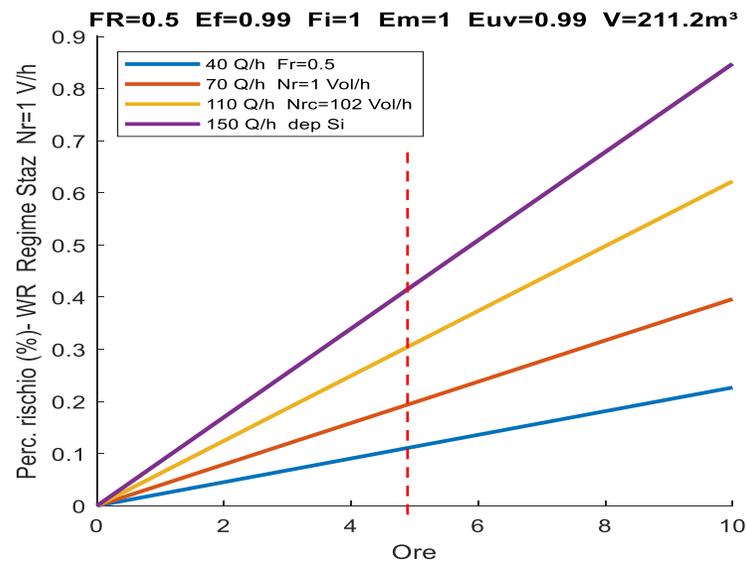
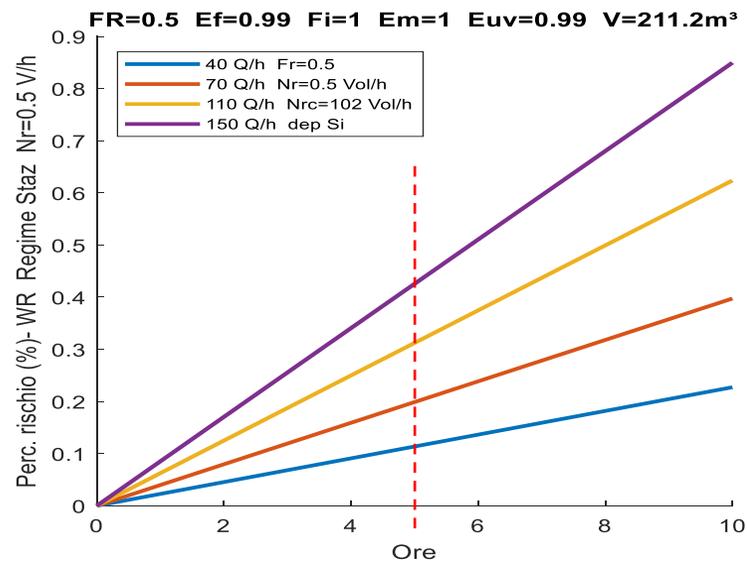
Confronto fra i tre metodi di calcolo – WR e GN



Confronto fra i tre metodi di calcolo – WR e RM



Confronto fra i tre metodi di calcolo – Walls-Riley stazionario



Conclusioni sull'utilizzo dei metodi di calcolo

I tre metodi di calcolo si equivalgono, purché utilizzati per condizioni transitorie. Il metodo di **Walls-Riley** fornisce risultati sottostimati per le condizioni stazionarie.

Per applicazioni normali è consigliabile utilizzare il metodo di **Gammaitoni- Nucci**.

Per ambiente con sensori di **CO₂** (ad esempio, negli ospedali) il metodo di **Rudnick-Milton** consente di calcolare con molta precisione la probabilità di contagio.

Inoltre, questo metodo offre più procedure di utilizzo: progetto, verifica, inverso.

In ogni caso questi strumenti di calcolo sono preziosi per valutare i rischi di contagio a **grande distanza** (oltre i 2 metri) dovuto essenzialmente ai droplet nuclei che formano gli **aerosol**.

Tutte le misure previste per la protezione del contagio a **breve distanza** restano valide non potendosi evitare il contagio diretto dovuti ai droplet emessi per respirazione, parlato, tosse e starnuto.

E' comunque essenziale mantenere la mascherina protettiva all'interno dei locali per ridurre la probabilità di contagio sia a breve che a grande distanza.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Prof. Ing. Giuliano Cammarata

Web: www.giulianocammarata.it

Mail: cammaratagiuliano@gmail.com

