

APPROFONDIMENTI SUGLI IMPIANTI A TUTT'ARIA CON RICIRCOLO DURANTE LA PANDEMIA SARS-CoV-2

Alberto Cavallini, University of Padova, Manens-TiFS SpA, Padova

Filippo Busato, Telematic University Mercatorum

Fabrizio Pregliasco, University of Milan

Corresponding author:

Filippo Busato, filippo.busato@unimercatorum.it,

(traduzione fedele a cura degli autori)

Scarica la versione in inglese pubblicata su AiCARR Journal n. 63 al seguente [link](#)

Sommario

La pandemia di SARS-CoV-2 ha destato grande interesse nel mondo della climatizzazione per quanto riguarda la progettazione dei nuovi impianti e la gestione degli impianti esistenti. I temi che sono stati posti in evidenza riguardano anche la gestione del rischio negli impianti a tutt'aria che prevedono il ricircolo dell'aria tra ambienti diversi. Questo articolo valuta, secondo un approccio analitico, le probabilità di contagio per diverse configurazioni impiantistiche, considerando il ruolo del ricircolo dell'aria e le possibilità di miglioramento date dalla rimozione o disattivazione (per filtrazione o altre tecnologie come irradiazione UV-C, ionizzazione ...) delle cariche virali, ponendo particolare attenzione alle modalità di gestione delle portate d'aria in relazione agli schemi impiantistici adottati.

Simbologia

C :	<i>concentrazione di dosi infettanti [quanta m^{-3}]</i>
I :	<i>numero di individui infetti asintomatici</i>
k :	<i>fattore di rimozione per deposizione nell'ambiente [h^{-1}]</i>
N :	<i>fattore complessivo di rimozione nell'ambiente, $N = \lambda + k + rn$ [h^{-1}]</i>
NS :	<i>numero totale di soggetti coinvolti (asintomatici infetti e suscettibili)</i>
n_0 :	<i>numero iniziale di dosi infettanti nel volume V ($t = 0$) [quanta]</i>
P :	<i>probabilità di infezione riferita al singolo individuo suscettibile</i>
p :	<i>tasso di respirazione polmonare dell'individuo suscettibile [m^3h^{-1}]</i>
Q :	<i>portata d'aria [m^3h^{-1}]</i>
q :	<i>emissione di dosi infettanti da parte di un soggetto asintomatico [quanta h^{-1}]</i>
R^* :	<i>numero medio di soggetti suscettibili potenzialmente infettati da una persona contagiosa (indice di riproduzione dello scenario specifico)</i>
rn :	<i>tasso di ventilazione con aria esterna [h^{-1}]</i>
rc :	<i>tasso di ricircolo [h^{-1}]</i>
T, t	<i>tempo [h]</i>
V :	<i>volume [m^3]</i>
λ :	<i>fattore di rimozione per inattivazione del virus in ambiente [h^{-1}]</i>
η_j :	<i>efficienza di rimozione/inattivazione nel ricircolo</i>

Introduzione

Lo scoppio dell'epidemia di SARS-CoV-2 nella stagione invernale 2019-20 ha attirato una particolare attenzione nei confronti degli impianti HVAC e il loro possibile contributo nella diffusione della malattia. Secondo le pubblicazioni recenti, vi è una elevata probabilità che il virus possa sopravvivere secondo modalità aerobiche [1]. Di grande importanza è anche un articolo di compendio [2] che sottolinea come diversi fattori quali il tasso di ventilazione, la direzione dei flussi d'aria e la posizione relativa di suscettibile e infettato, possano influenzare la probabilità di infezione in ambiente confinato. Per valutare il rischio nella fase di pandemia, si deve pertanto fare affidamento a modelli per particelle trasportate in aerosol. Secondo la conoscenza più recente riguardo il virus, il modello preferibile è quello di Wells-Riley [3], che viene ampiamente condiviso dagli articoli recentemente pubblicati [4].

Questo lavoro, per mezzo di modelli basati su bilanci di concentrazione e massa nei sistemi HVAC a tutt'aria, calcola la concentrazione del patogeno e la risultante probabilità di infezione e il numero di soggetti potenzialmente infettati in alcune diverse configurazioni di spazi segregati, serviti dallo stesso impianto di climatizzazione.

Lo scopo principale di questa pubblicazione è quello di aiutare a costruire un consapevole piano di valutazione del rischio nei sistemi HVAC, che sia utile per progettisti, costruttori, gestori e proprietari degli edifici.

Metodi e dati in ingresso

Secondo il modello di Wells-Riley [4], la probabilità di infezione per un soggetto suscettibile nei confronti di una malattia trasmissibile via aerosol segue la distribuzione di Poisson secondo l'Equazione 1:

$$P = 1 - e^{-p \cdot \int_0^T C_I(t) dt}$$

Equazione 1. Modello probabilistico di Wells-Riley.

nella quale il valore dell'esponente è la dose di quanta inalata da un soggetto suscettibile durante il tempo di esposizione T . Nell'equazione 1 p è il tasso di respirazione polmonare [m^3/h], $C_I(t)$ la concentrazione istantanea di dosi infettanti [$quanta/m^3$] nell'ambiente (considerato in miscelazione perfetta), e T [h] è il tempo totale di esposizione. La probabilità risultante P è un numero reale nell'intervallo $[0; 1]$.

Implementato il modello di Gammaitoni-Nucci [5], si può valutare C_I come:

$$C_I = \frac{q \cdot I}{N \cdot V} + \left(\frac{n_0}{V} - \frac{q \cdot I}{N \cdot V} \right) \cdot e^{-N \cdot t}$$

Equazione 2. Formula di Gammaitoni-Nucci.

Le equazioni 1 e 2 con $n_0 = 0$ determinano la probabilità di infezione P :

$$P = 1 - \exp \left[\frac{q \cdot I \cdot p}{V} \left(\frac{1 - N \cdot T - e^{-N \cdot T}}{N^2} \right) \right]$$

Equation 3. Probabilità di infezione per una persona suscettibile.

Di seguito questo lavoro applica il modello (con tutte le ipotesi del caso, inclusa quella di ambiente perfettamente miscelato) nel simulare alcune configurazioni impiantistiche HVAC in un edificio per uffici. Di conseguenza, il livello di attività degli individui coinvolti è stato assunto nella categoria di "attività leggera-parlato" <light activity –speaking>.

Tra tutti i parametri di ingresso necessari all'applicazione del modello descritto, l'emissione di quanta infettanti da parte del soggetto asintomatico relativamente al virus SARS-CoV-2 è sicuramente il più controverso e incerto, con ampio spettro di variazione.

Attualmente l'unico dato disponibile per q specificamente per il virus SARS-CoV-2 proviene da una singola fonte, Buonanno *et al.* [4, 6, 7]. In un articolo specifico [4] gli autori propongono un modello predittivo per l'emissione, in grado di stimare il tasso di emissione di quanta infettanti da parte di un soggetto infetto basata sul carico virale nello sputo e la concentrazione di droplets espirati nel corso di attività differenti. Nello stesso lavoro, gli autori analizzano il caso peggiore nello scenario, in presenza di un soggetto asintomatico SARS-CoV-2 in alcuni ambienti: una farmacia, un supermercato, un ristorante, un ufficio postale e una banca. In tutti i casi, il valore assunto per l'emissione di quanta è stato pari a $q = 142$ quanta h^{-1} (147 quanta h^{-1} nel lavoro [6]), associato ad un tasso di ventilazione polmonare pari a $p = 0,96$ $m^3 h^{-1}$ (0,54 $m^3 h^{-1}$ nel medesimo lavoro [6]).

In un successivo lavoro in bozza (Buonanno *et al.* [7]), gli stessi autori presentano un nuovo metodo per la valutazione quantitativa del rischio di infezione, basato sulla determinazione, attraverso il metodo Monte Carlo della funzione di densità di probabilità dell'emissione di quanta, della concentrazione di quanta e della dose infettante inalata da un soggetto suscettibile. Per una trattazione semplificata come quella utilizzata in questo lavoro, suggeriscono di adottare, per

l'emissione infettante di quanta da parte dell'asintomatico, il valore dell'85° percentile del tasso di emissione della rispettiva funzione di probabilità. Per l'attività "attività fisica leggera-parlato" <light exercise-speaking>, il valore coerente secondo la [8] è di $q = 26,3$ quanta h^{-1} (per sottolineare la forte dipendenza di questo parametron dal livello di attività, il valore suggerito per "attività leggere-parlato sostenuto" <light exercise-loudly speaking>, è pari a $q = 170$ quanta h^{-1} , mentre per "attività leggera-respirazione" <light exercise-oral breathing> è $q = 5,6$ quanta h^{-1}).

Nella medesima anteprima Buonanno *et al.* [7] eseguono una valutazione retrospettiva di due casi documentati di contagio da Covid-19: in un ristorante a Guangzhou (Cina) e alle prove di un coro a Skagit Valley (Washington State, USA). Nel primo caso, il calcolo inverso dell'emissione virale dell'infetto porta a $q = 61$ quanta h^{-1} ; questo valore, per un soggetto infetto in "attività fisica leggera-parlato" è molto vicina al 94° percentile della funzione di densità di probabilità di q (62,2 quanta h^{-1}). Nel caso delle prove del coro il calcolo inverso porta a $q = 341$ quanta h^{-1} , valore prossimo al 93° percentile della funzione di densità di probabilità di p di un individuo infetto mentre canta (353 quanta h^{-1}). Questi esempi mostrano che, con riferimento al valore dell'85° percentile della funzione di densità di probabilità q di Buonanno *et al.*, l'analisi Monte Carlo è una scelta di base lontana dal riprodurre il caso peggiore.

Tuttavia, i valori dell'emissione di quanta utilizzati nelle simulazioni di questo lavoro sono allineate con quelli suggeriti da Buonanno *et al.* [7], cioè $q = 26,3$ quanta h^{-1} .

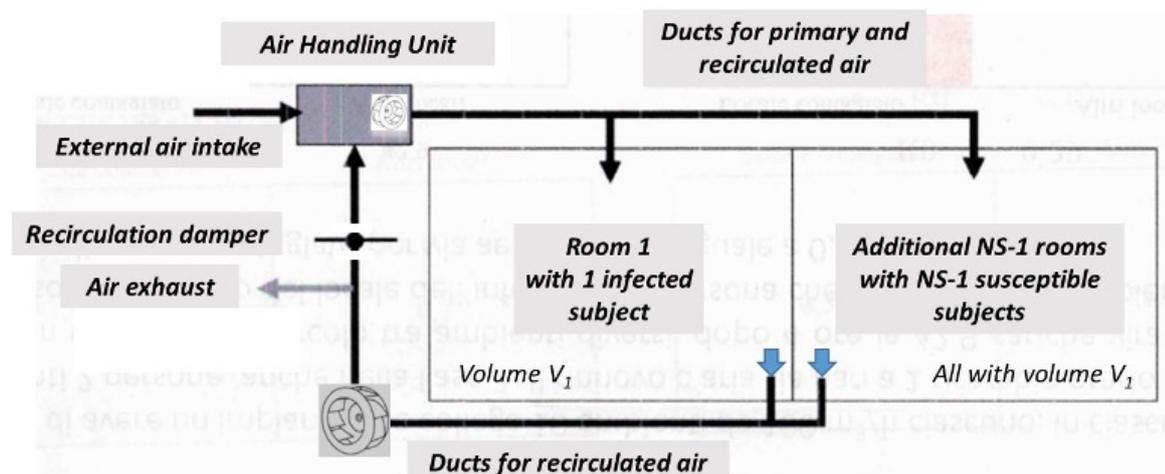
Riguardo al tasso di respirazione polmonare p , Adams (come ripreso in Buonanno *et al.* [5]) fornisce i seguenti valori, mediati tra maschio e femmina: 0,49 m^3h^{-1} (a riposo), 0,54 m^3h^{-1} (in piedi), 1,38 m^3h^{-1} (attività leggera), 2,35 m^3h^{-1} (attività moderata) e 3,30 m^3h^{-1} (attività intensa). Tutte le simulazioni effettuate nel presente lavoro riportano cautelativamente il valore $p = 0,8 m^3h^{-1}$.

Per quanto concerne i fattori di rimozione λ (dovuto all'inattivazione) and k (dovuto alla deposizione per gravità), ancora una volta i valori assunti nelle simulazioni concordano con quelli indicati da Buonanno *et al.* [5]: $\lambda = 0,63 h^{-1}$ (basato su un tempo di semivita di SARS-CoV-2 pari a 1,1 h) e $k = 0,24 h^{-1}$ (basato sull'altezza della sorgente di emissione pari a 1,5 m).

Infine, i valori assunti per il tasso di ricircolo rc e di rinnovo con aria esterna rn sono in linea con le attuali pratiche progettuali; i valori estremi sono invece utili a evidenziare il trend dei risultati dei calcoli.

A causa dell'elevata incertezza in qualcuno dei dati di ingresso (per il tasso di emissione di quanta q , probabilmente anche di un fattore 5), il lettore è invitato a considerare i risultati assoluti delle simulazioni numeriche con prudenza. Allo stato attuale di conoscenza di questa particolare patologia, è molto più importante considerare l'andamento e le variazioni dei risultati al variare dei parametri di ingresso delle misure di contenimento/abbattimento.

Impianto di climatizzazione a tutt'aria con ricircolo



Source: AiCARR

Figura 1. Schema di impianto di climatizzazione a tutt'aria a servizio di più locali.

Lo schema di Figura 1 rappresenta un impianto di climatizzazione a tutt'aria per un edificio ad uso uffici, con ricircolo dell'aria tra NS locali separati ciascuno di volume $V_1 = 50 \text{ m}^3$ e ciascuno con un solo occupante. Il locale 1 ospita un singolo individuo asintomatico, mentre i rimanenti $NS-1$ locali ospitano $NS-1$ individui suscettibili equamente distribuiti. Tutti gli individui occupano il proprio locale per un tempo $T = 8$ ore. Al momento la simulazione assume che il ricircolo dell'aria non implichi rimozione o inattivazione aggiuntive dei quanti infettanti.

Per modellare la diffusione dell'agente infettante tra i locali si possono considerare due modelli, il primo a cui si farà riferimento come *uniforme* ed il secondo come *segregato*, come illustrato in seguito.

Il modello uniforme

Si può assumere che l'effetto di ricircolo sia equivalente all'eliminazione delle partizioni che separano i diversi spazi: tutti i locali sono quindi considerati come un unico locale di volume totale $V = NS \cdot V_1$, così le equazioni 2 and 3 possano essere applicate direttamente al volume complessivo. Le Figure 2, 3 e 4 illustrano i risultati della procedura come una funzione del numero dei diversi locali (o del numero delle persone) NS coinvolte.

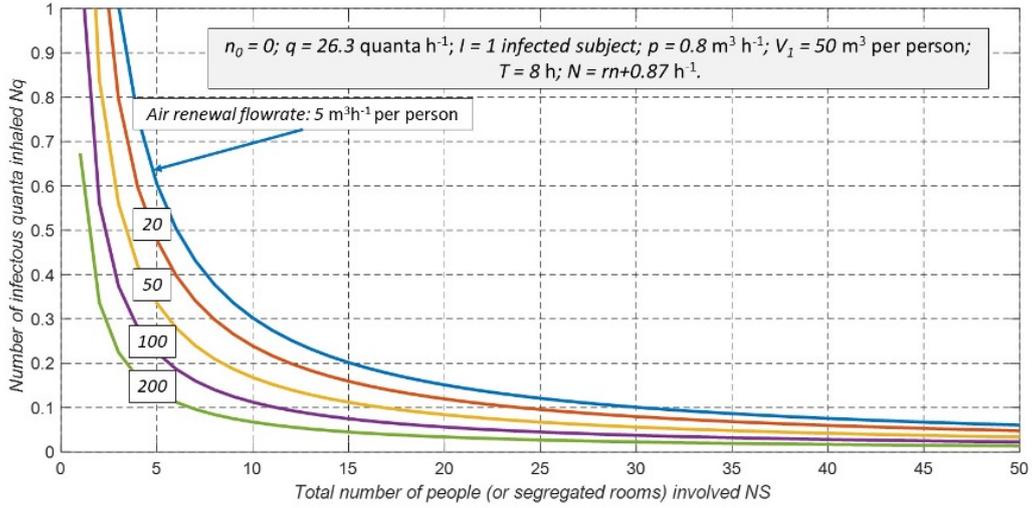


Figura 2. Concentrazione delle cariche virali dopo 8 h.

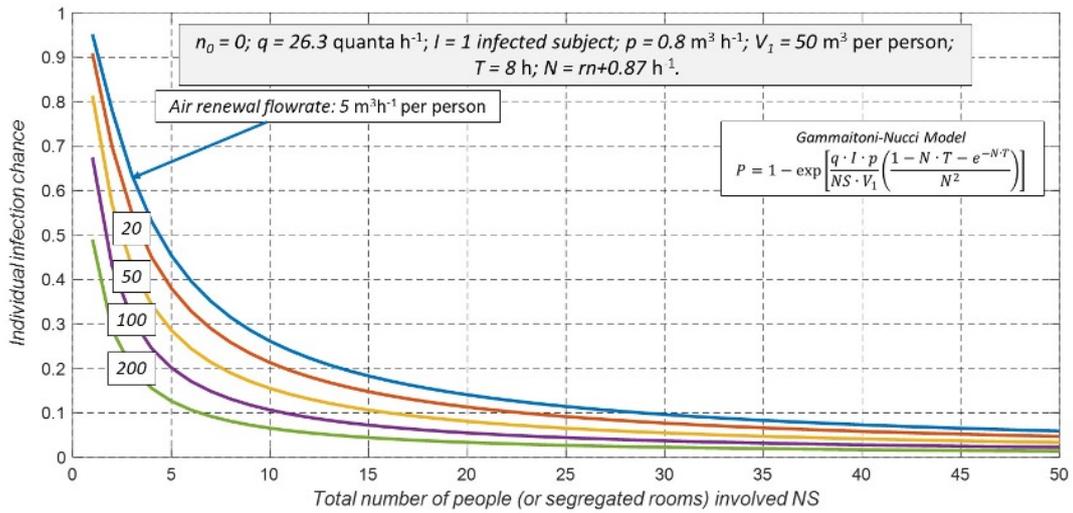


Figura 3. Probabilità di infezione per un asintomatico dopo 8 h.

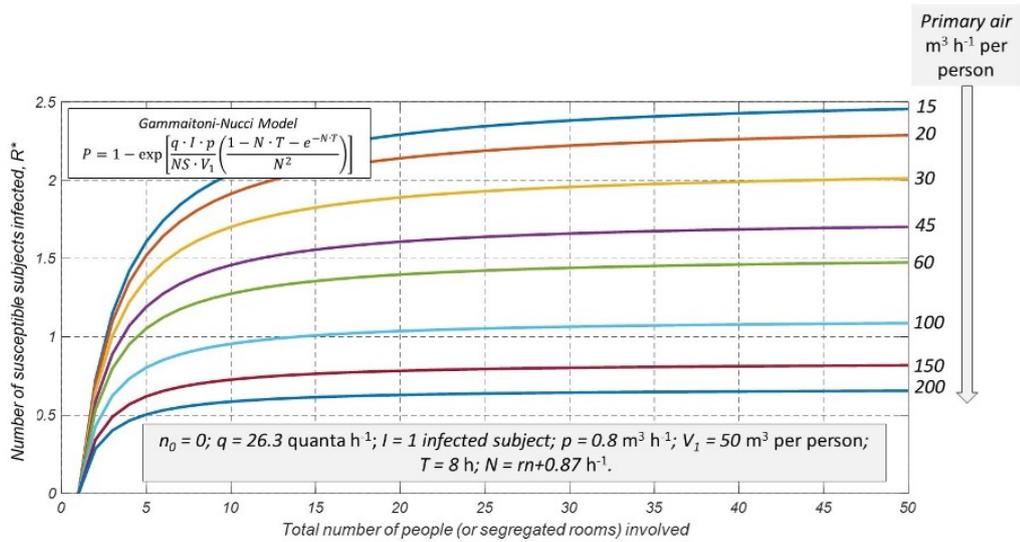


Figure 4. Numero di persone suscettibili infettate dopo 8 h.

$$\frac{\partial C_S}{\partial t} = rc \cdot C_R - (rc + N) \cdot C_S$$

Equazione 5. Bilancio di concentrazione per gli NS-1 locali degli individui suscettibili

$$C_R = \frac{C_I + (NS - 1) \cdot C_S}{NS}$$

Equazione 6. Bilancio di concentrazione per l'aria ricircolata.

Includendo l'Equazione 6 (bilancio di concentrazione nel ricircolo) nel modello, il risultato è un sistema di equazioni differenziali algebriche (PDAE) riducibile ad un sistema differenziale del primo ordine (PDE) che può essere risolto analiticamente e le soluzioni del quale sono state omesse per brevità. Il sistema può essere risolto numericamente in ambiente Matlab.

La Figura 6 illustra i risultati dell'applicazione del modello segregato nei termini dell'indice di riproduzione R^* al variare del numero di soggetti coinvolti NS.

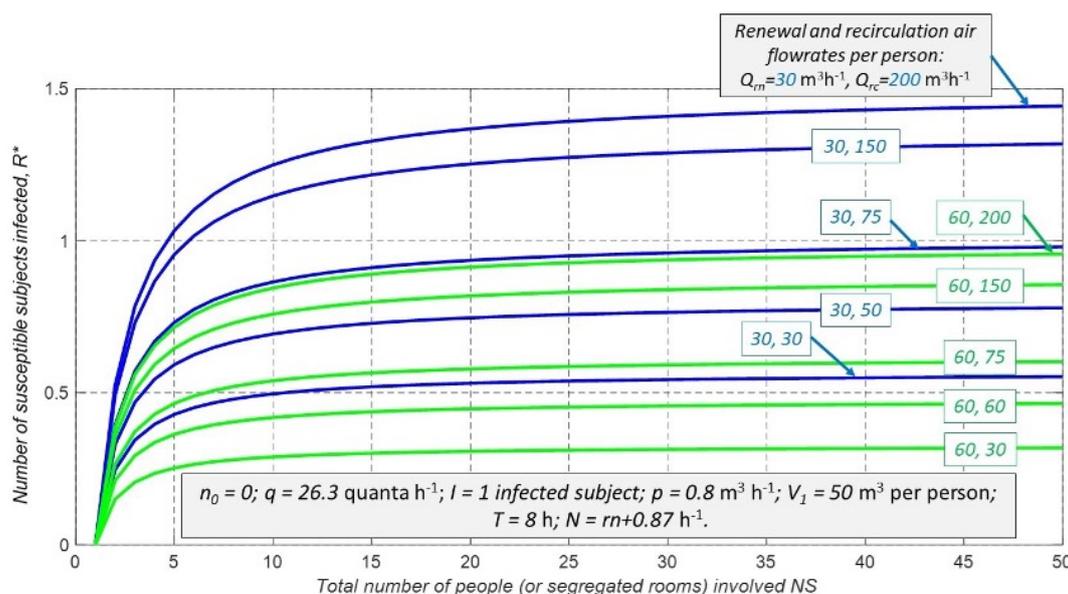


Figura 6. Numero di persone suscettibili potenzialmente infettate dopo 8 h.

È possibile notare la dipendenza di R^* sia dal tasso di rinnovo con aria esterna sia dal tasso di ricircolo.

L'effetto della rimozione/inattivazione del virus nel condotto di mandata

È possibile estendere il modello segregato per valutare l'effetto della presenza di un sistema di filtrazione o inattivazione (filtro ad alta efficienza, radiazione UV-C, ossidazione fotocatalitica, plasmacluster o ionizzazione negativa dell'aria) nel condotto di mandata (a valle del plenum di miscelazione). Se si assume un'efficienza di rimozione/inattivazione η_f nell'intervallo $[0; 1]$, si

introduce di conseguenza un fattore moltiplicativo pari a $(1 - \eta_f)$ nella formula per il calcolo di C_R nell'Equazione 6. Le Figure da 7 a 10 illustrano i risultati ottenuti, riferendosi al caso di doppia occupazione dei locali, per valutare l'effetto di rimozione/inattivazione sul compagno di stanza suscettibile nel locale dell'infermo. Come si può vedere nei grafici delle Figure da 7 a 10, il caso considera 2 occupanti nel locale 1 (1 infetto e 1 suscettibile) di volume $2V_1$, mentre le rimanenti $NS-2$ persone sono segregate negli altri locali; come in precedenza ciascun soggetto ha a disposizione un volume ambiente pari a $V_1 = 50 \text{ m}^3$. Quindi il numero di soggetti potenzialmente infettati considera un suscettibile nel locale 1 e $NS-2$ nei rimanenti locali; in questo caso il numero di soggetti potenzialmente infettati non può raggiungere il valore 0 nemmeno con $rc = 0$, a causa della presenza del suscettibile nel locale 1.

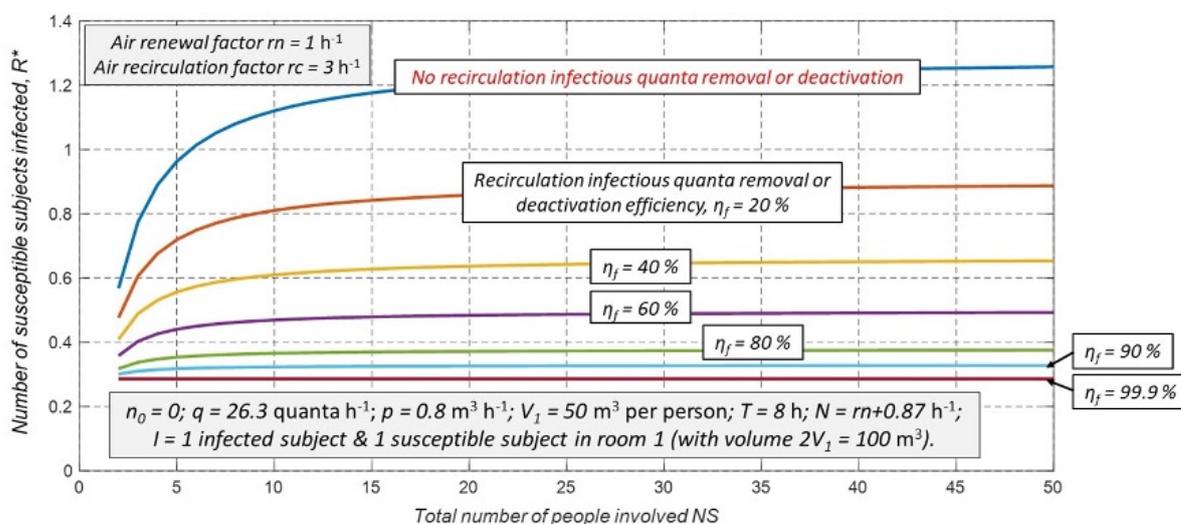


Figura 7. Effetto delle diverse efficienze di rimozione/inattivazione.

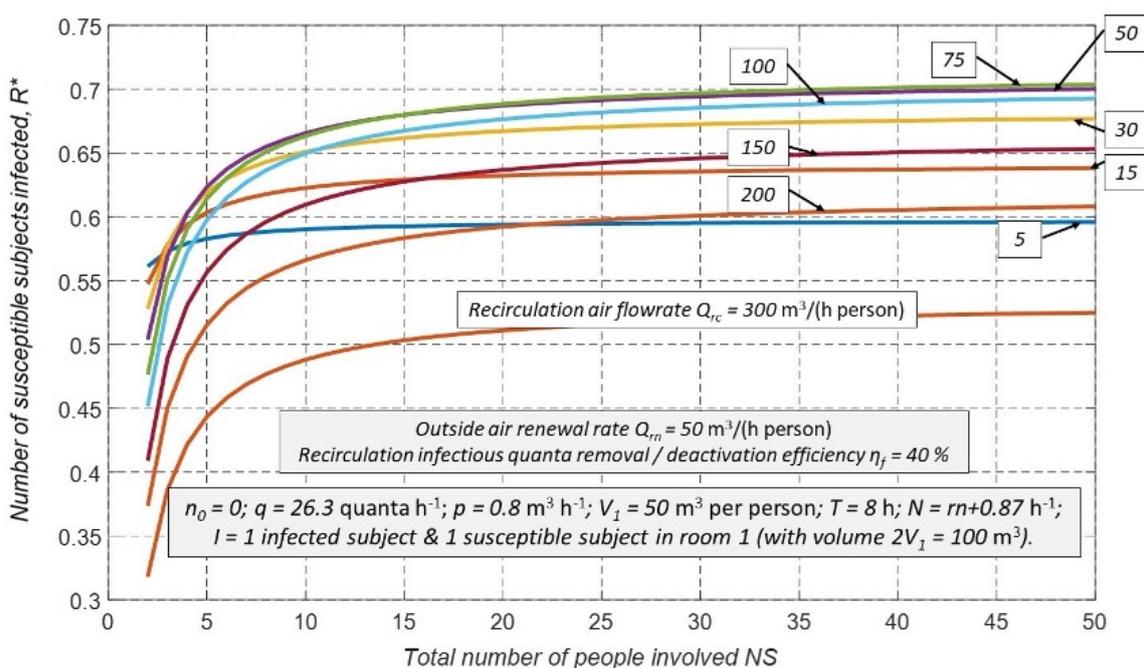


Figura 8. Effetto del tasso di ricircolo per una efficienza di rimozione/inattivazione del 40%.

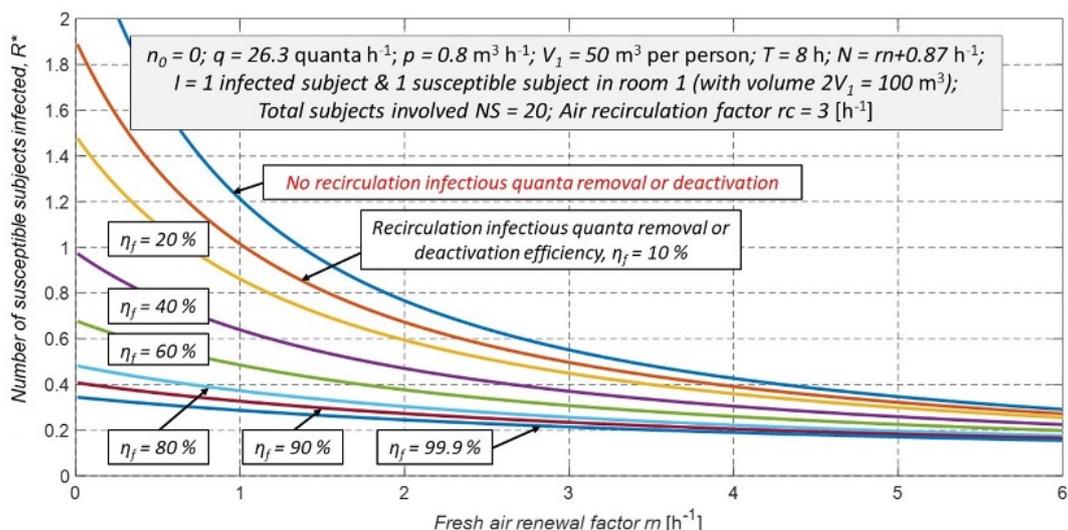


Figura 9. Effetto del tasso di rinnovo d'aria per diverse efficienze di rimozione/ inattivazione.

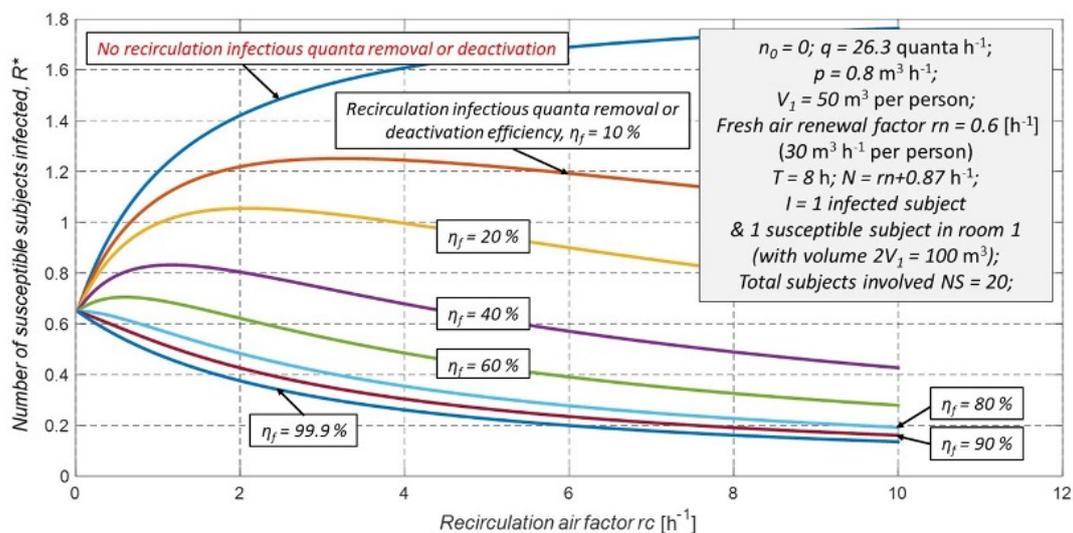


Figure 10. Effetto del tasso di ricircolo per diverse efficienze di rimozione/inattivazione.

È interessante osservare che, nel caso illustrato in Figura 8, l'indice di riproduzione R^* raggiunge un massimo all'aumentare del tasso di ricircolo, per poi diminuire con un ulteriore aumento di questo tasso. Questa conclusione, come evidenziato anche in Figura 10 per efficienza di rimozione/inattivazione inferiore all'80%, è dovuto al doppio effetto contrastante che si presenta all'aumentare del tasso di ricircolo quando sono presenti sistemi di purificazione dell'aria. Da un lato il ricircolo diffonde il virus nei locali occupati dai soggetti suscettibili; dall'altro il ricircolo contribuisce a rimuovere/inattivare il virus in tutti i locali.

L'effetto della gestione della ventilazione negli spazi comuni

Con un opportuno adattamento delle equazioni dalla 3 alla 5, è possibile estendere il modello a casi applicative reali, considerando anche gli spazi comuni e le tempistiche di presenza nei locali. La Figura 11 illustra uno schema nel quale, in aggiunta agli NS uffici a singolo occupante, ci sono gli spazi comuni (corridoi, locali di servizio), con un volume che ammonta al 20% del volume totale

degli uffici serviti dal sistema HVAC. Il soggetto infetto si trova nel locale 1 e, insieme ai suoi colleghi, trascorre una frazione dell'orario di lavoro (8 ore al giorno) negli spazi comuni. Tutti gli occupanti lasciano l'edificio per un'ora di pausa pranzo dopo le 4 ore mattutine e rientrano per le 4 ore pomeridiane. Un ventilatore di ripresa nei locali di servizio estrae una frazione della portata complessiva d'aria, mentre l'unità di trattamento aria fornisce il 100% della portata di aria esterna unicamente ai singoli uffici; non vi è mandata d'aria direttamente nel corridoio né tantomeno nei locali comuni.

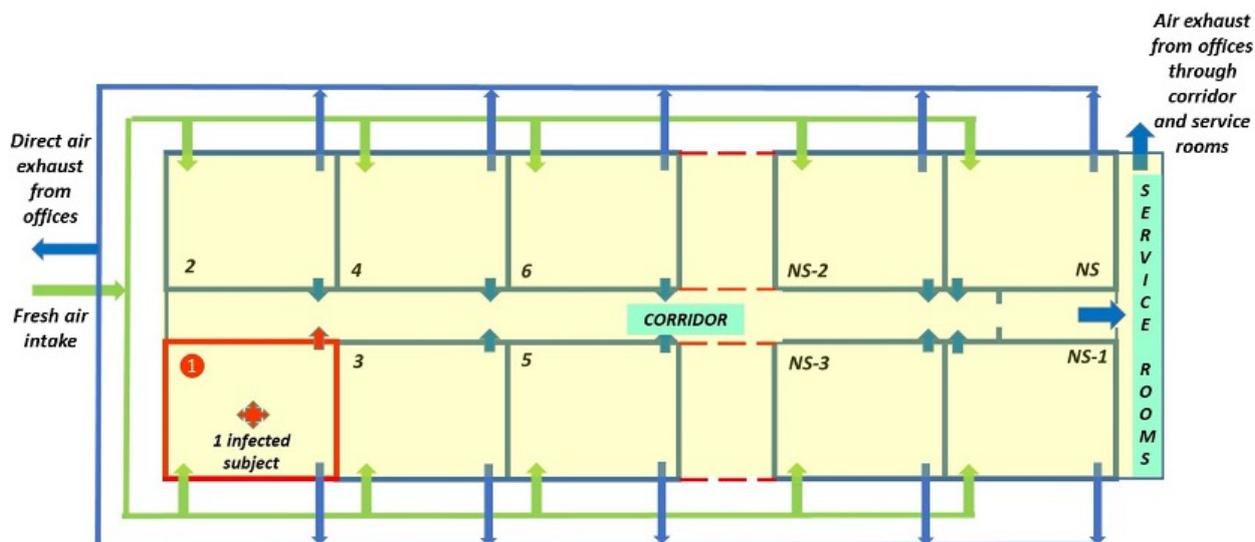


Figura 11. Modello fisico che include aree comuni.

La Figura 12 mostra lo sviluppo temporale della concentrazione virale nel locale dell'infetto, mentre la Figura 13 mostra il medesimo sviluppo temporale della concentrazione di quanta negli spazi comuni in miscelazione perfetta (corridoio, locali di servizio). L'ipotesi è quella secondo cui l'infetto, insieme ai colleghi, trascorra 20 minuti durante l'orario di lavoro nelle aree comuni; il grafico si riferisce ad un numero totale di soggetti coinvolti pari a $NS = 10$, un tasso di rinnovo $rn = 1 \text{ h}^{-1}$, e il 10 % della portata totale estratta dalle aree comuni.

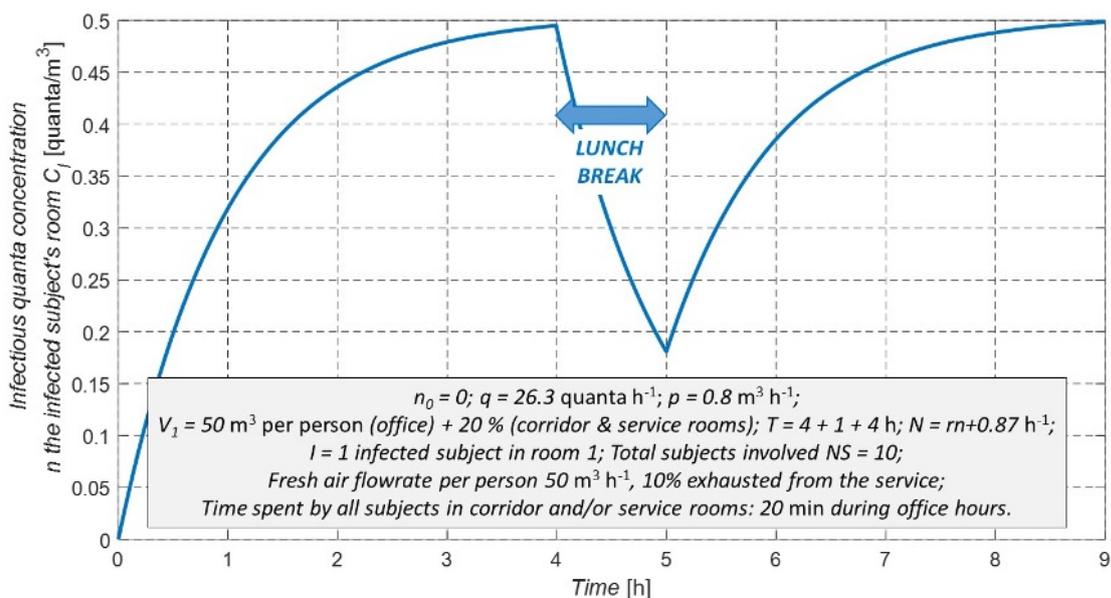


Figura 12. Concentrazione delle cariche virali nel locale dell'infecto.

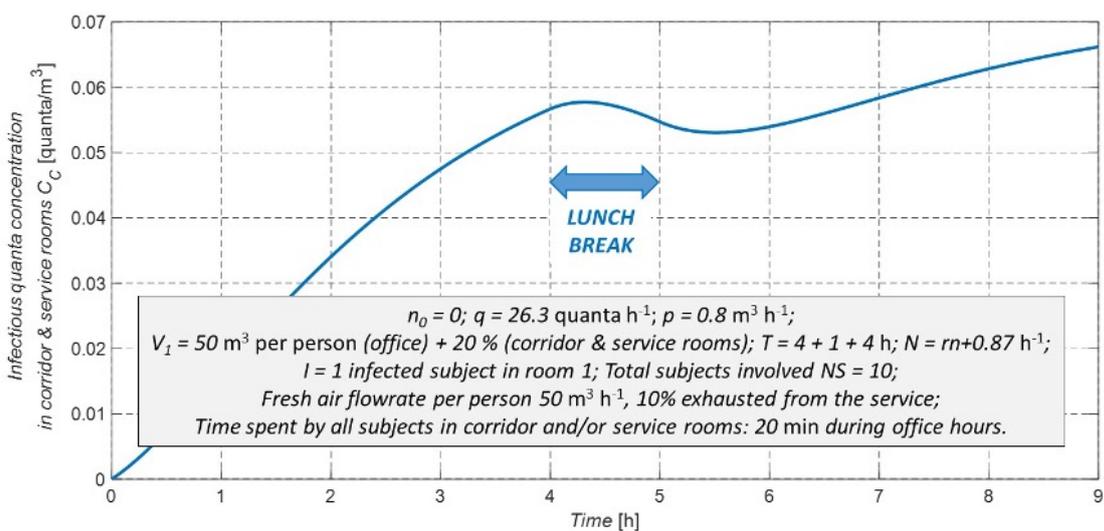


Figura 13. Concentrazione delle cariche virali nelle aree comuni.

Il successivo grafico in Figura 14 illustra come la presenza dell'individuo infetto negli spazi comuni e la frazione di portata estratta dagli spazi comuni influenzino il numero dei soggetti suscettibili potenzialmente infettati durante la giornata. È interessante apprezzare in Figura 15, come la frazione di portata estratta dagli spazi comuni riduca il numero di individui potenzialmente infettati.

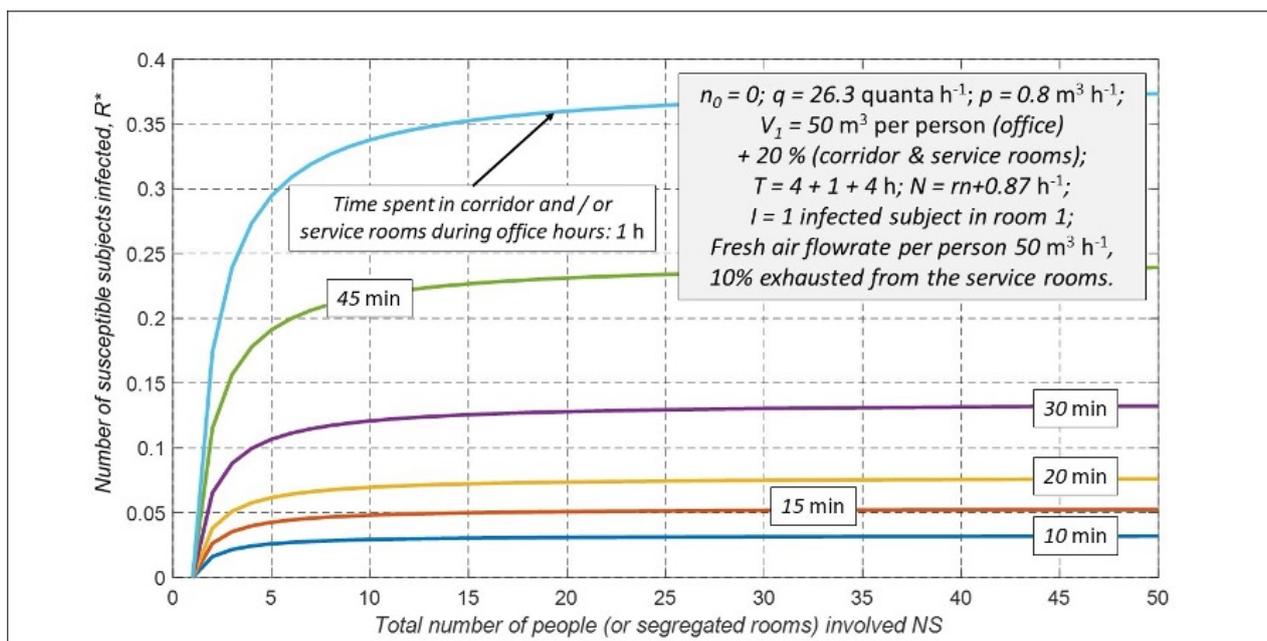


Figura 14. Numero di persone potenzialmente infettate in funzione del tempo trascorso nelle aree comuni.

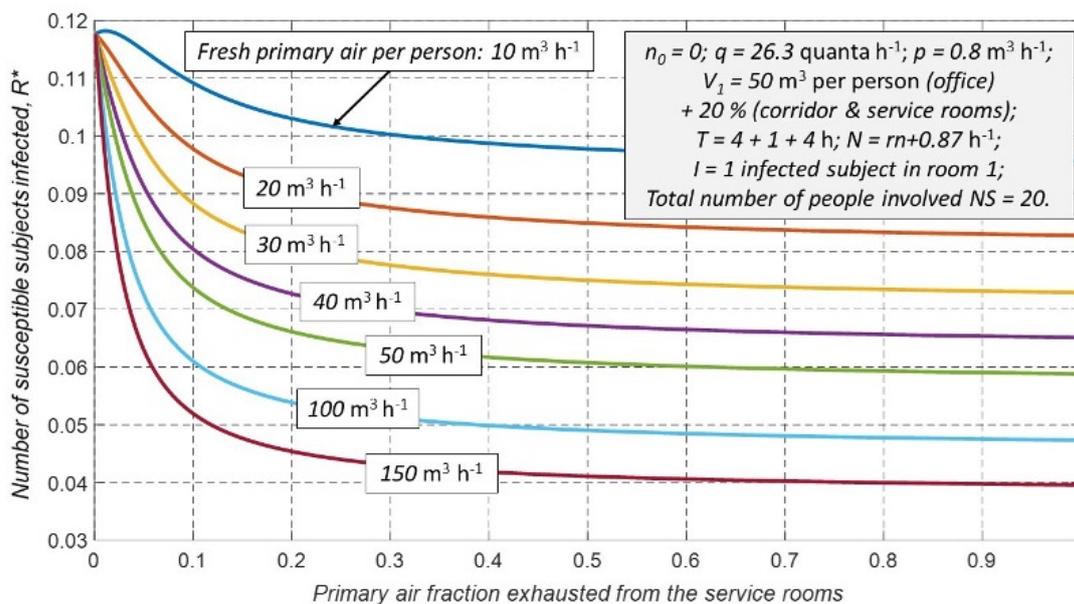


Figura 15. Numero di persone potenzialmente infettate in funzione del tasso di rinnovo e della frazione di portata estratta dalle aree comuni.

Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro è quello di calcolare, mediante bilanci di concentrazione e modello di infezione secondo Wells-Riley, la probabilità di infezione in sistemi di climatizzazione a tutta aria con ricircolo. Dopo una breve analisi del modello più semplice (già elaborata nella letteratura esistente), sono stati introdotti diversi miglioramenti del modello. Come illustrato, i risultati

sottolineano una considerazione importante legata agli impianti di climatizzazione con ricircolo: il solo effetto di diluizione in tanti ambienti non è sufficiente a compensare l'aumento del numero di soggetti suscettibili coinvolti. D'altro canto, elevati tassi di rinnovo possono ridurre fortemente il rischio di infezione in corrispondenza di un dato valore del tasso di ricircolo; inoltre la filtrazione meccanica (o altre tecniche equivalenti di rimozione/inattivazione del virus, come ad esempio la irradiazione UV-C) è uno strumento molto potente per ridurre la probabilità di infezione, soprattutto se accoppiata con elevati tassi di ricircolo. In conclusione è altresì molto importante considerare, in applicazione a casi reali, come la gestione delle portate negli spazi comuni e segregati possa portare a significativi cambiamenti nel comportamento del sistema.

Bibliografia

- [1]. Morawska L., Cao J., Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environment International* 2020; 139; 105730; <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
- [2]. Ai Z.T., Melikov A. K., Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: a review. *Indoor air* 2018, <https://doi.org/10.1111/ina.12465>
- [3]. Sze To G.N., Chao C.Y.H., Review and comparison between the Wells–Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases. *Indoor air* 2010; 20; 2-16; <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00621.x>
- [4]. Buonanno G., Stabile L., Morawska L., Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. *Environment International* 2020; 141; <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105794>
- [5]. Gammaitoni L, Nucci M. C., Using a Mathematical Model to Evaluate the Efficacy of TB Control Measures. *Emerging Infectious Diseases* 1997, vol. 3, n. 3, 335-342.
- [6]. Buonanno G., Stabile L., Morawska L., Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. <https://doi.org/10.1101/2929.04.1220062828>
- [7]. Buonanno G., Stabile L., Morawska L., Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS CoV-2 infection: prospective and retrospective applications. medRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/2020.06.0120118984>.
After the submission of this manuscript to the AJ Editor, the peer-reviewed article from the above manuscript has been published:
Buonanno G., Stabile L., Morawska L., Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications. *Environment International* 145 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112>
- [8]. Jimenez J. L., COVID-19 Aerosol Transmission Estimator. <https://cires.colorado.edu/news/covid-19-airborn-transmission-tool-available>

Conflitto di interessi

Gli autori dichiarano l'assenza di conflitti di interesse economico o di altro tipo in tutte le fasi di preparazione dell'articolo.