

Alessandro Zivelonghi<sup>1\*</sup>

# Mitigare il rischio di contagio aereo indiretto di SARS-CoV-2 nelle aule scolastiche

*The airborne risk transmission of SARS-CoV-2 in high-schools estimated with a single zone dynamic model*

<sup>1</sup>ITCS Lorgna Pindemonte, Verona, Italia; Power Consulting Studio, Verona, Italia

\*Corresponding author:

**Alessandro Zivelonghi**

Docente di Matematica, ITCS Lorgna Pindemonte, Verona, Italia  
PhD Max-Planck-Institut for Plasma Physics  
Power Consulting Studio  
Via Valpolicella 20  
37029 San Pietro in Cariano (VR), Italia  
ing.zivelonghi@gmail.com  
tel +39 340 2436285

DOI: 10.36164/AiCARRJ.64.05.04

## Sommario

In questi giorni di tensione e accesi dibattiti sulla chiusura delle scuole è opportuno fare chiarezza su un aspetto di fondamentale importanza per ipotizzare una ripresa delle attività in presenza: il nesso tra la cosiddetta “ventilazione naturale” e l’abbassamento della carica virale negli edifici scolastici nel contesto drammatico di abbassamento delle temperature e concomitante risalita delle curve epidemiologiche. Di quanto possiamo ridurre il rischio di contagio per aerosol virale nelle scuole mediante la sola apertura di porte e finestre? È possibile mitigare il rischio a livelli accettabili mediante la riduzione dei gruppi classe? In questo studio, attraverso un’analisi di rischio basata su un semplice modello monozona dinamico con parametrizzazione della produzione oraria di cariche virali, viene mostrata approssimativamente ma quantitativamente l’influenza dell’aerazione, delle mascherine e della riduzione dei gruppi classe nella strategia di mitigazione del rischio di contagio aereo indiretto. I risultati mostrano che per quanto attiene il rischio di contagio aereo indiretto, una ripresa delle attività in presenza nelle scuole superiori è condizionata da opportuni cicli di aerazione dell’aula, obbligatorietà della mascherina e misure di riduzione dei gruppi classe (anche mediante adozione di forme di didattica a distanza alternata).

### Parole chiave:

- ▶ trasmissione aerea
- ▶ aerosol virale
- ▶ scuole
- ▶ aule scolastiche
- ▶ SARS-CoV-2
- ▶ Modello GN

## Abstract

In these days of tough debate on the closure of schools in Italy and worldwide, it is important to shed light on a critical aspect: the risk of aerosol contagion in schools and the link between “natural ventilation” and the lowering of such risk. Besides wearing face mask, to which extent can we further reduce the risk of contagion in classrooms by windows and doors opening as well as by mechanical ventilation? In this work, some risk reduction scenarios in high-schools are presented based on the one dimensional dynamic GN-model. The aim is to approximately quantify the effect of natural and mechanical ventilation in classrooms and to include it in a risk mitigation strategy. The findings show that for what concerns airborne transmission risk, a possible reprise of face-to-face lectures in high-schools is conditioned to a sufficient air ventilation level of classrooms, mandatory face mask for students and reduction of the number of students per classroom (also by alternating groups in presence).

### Keywords:

- ▶ airborne transmission
- ▶ school classrooms
- ▶ natural ventilation
- ▶ SARS-CoV-2
- ▶ GN-model

## Introduzione

Negli ultimi mesi si è sempre più consolidata l'ipotesi di un canale di contagio aereo indiretto del virus SARS-Cov2 [Morawska Tang 2020, Morawska Milton 2020], la quale ha importanti implicazioni in particolare nei luoghi chiusi e nelle scuole [Vio 2020, Cammarata 2020]. Il presente contributo si inserisce nel contesto di un acceso dibattito sull'opportunità di chiusura o riapertura delle scuole e di un recentissimo passaggio alla modalità a distanza per tutte le scuole superiori a seguito di una brusca risalita dei contagi da SARS-Cov2 sul territorio nazionale. Sul fronte della mitigazione di tale canale di contagio autorevoli pubblicazioni scientifiche in contesti diversi [Leung 2020, Escombe 2007], suggeriscono che la trasmissione di malattie infettive in luoghi chiusi per via indiretta possa essere sensibilmente ridotta, oltre che mediante l'uso di Dispositivi di Protezione Individuale (DPI) quali le mascherine facciali, anche attraverso aerazione, in particolare mediante ventilazione naturale operata con l'apertura frequente di porte e finestre. Sebbene la maggior parte della letteratura scientifica che si è occupata dell'influenza dell'aerazione si riferisca a studi su Tubercolosi e Influenza in ambito ospedaliero il principio generale della diluizione di carica virale mediante aerazione (escludendo i luoghi con impianti speciali in sovrappressione) è valido anche per il virus SARS-Cov2 negli edifici scolastici. L'approccio basato sulla ventilazione naturale non è l'unico possibile: anche impianti di aerazione basati su ventilazione meccanica automatica (inclusi impianti ad aria primaria che integrano il riscaldamento/raffrescamento degli ambienti) possono essere altrettanto se non maggiormente efficaci laddove opportunamente configurati [AiCARR 2020]. Preme tuttavia ricordare e sottolineare che la stragrande maggioranza delle scuole italiane non ne sono dotate (a differenza degli ospedali) e non lo saranno nel breve periodo (sicuramente per tutto l'anno scolastico 2020/21). Un recentissimo articolo sottoscritto da numerosi autorevoli esperti internazionali [Morawska 2020] spiega come un meccanismo di trasmissione accertato di SARS-CoV-2 nei luoghi chiusi sia la formazione di microparticelle leggere di aerosol virali (con diametro  $< 5 \mu\text{m}$  da distinguersi rispetto alla droplets pesanti con diametro  $> 5 \mu\text{m}$ ) che si diffondono nel volume considerato dopo essere stati generati da una o più persone infette che permangono in esso per un tempo sufficientemente lungo. È proprio questo il potenziale pericolo nelle aule scolastiche, specie d'inverno. In assenza di un sufficiente ricambio d'aria, gruppi anche numerosi di alunni permangono per ore nello stesso spazio rischiando di entrare in contatto con l'aerosol virale generato anche da un solo soggetto positivo e di infettarsi anche mantenendo il distanziamento.

Quanto la mascherina chirurgica riesca ad impedire efficacemente questo canale di contagio per aerosol virale è questione dibattuta. Alcuni recenti risultati [Leung 2020] indicano una indubbia efficacia nella riduzione della carica virale di coronavirus nella fase di esalazione, a patto che la mascherina chirurgica sia correttamente e permanentemente indossata dal soggetto infetto e da quelli suscettibili. Nel contesto scolastico, tuttavia, si creano situazioni di lunga permanenza in classe degli alunni e indossare perfettamente la mascherina per tutta la durata delle lezioni risulta di difficile applicabilità. Il recente caso di uno studente colpito da crisi respiratoria in un liceo di Terni dove, in base alla autonomia scolastica, è stato prescritto l'obbligo della mascherina per tutta la durata delle lezioni, suggerisce uno scenario più realistico dove gli studenti toglieranno in alcuni momenti la mascherina in classe mantenendo il distanziamento. La stessa raccomandazione del Comitato Tecnico Scientifico (alla data del 20 Settembre 2020) è stata quella di tenerla il più possibile ma di poterla togliere durante le lezioni se il distanziamento viene rispettato. Ovvero, nella pratica, si è osservato che spesso gli alunni che rimanevano seduti al banco non

l'hanno indossata per una parte del tempo lezione. Il contagio per aerosol virale è quindi uno scenario assolutamente concreto e plausibile nelle scuole italiane (che va ovviamente limitato innanzitutto scongiurando la presenza di soggetti positivi a scuola) e che potrà ripresentarsi nel momento in cui ritorni a una didattica in presenza. È quindi intuitivo comprendere, in ottica precauzionale, l'importanza di un frequente ricambio d'aria al fine di diluire il più possibile l'eventuale carica virale accumulata nelle ore di lezione che si generasse in presenza di uno o più positivi. In questo senso, la ventilazione naturale, in quanto sistema economico e "ready-to-use" può assumere un ruolo di primaria importanza nella mitigazione del rischio di contagio nelle scuole. Un recente studio apparso su AiCARR Journal mette in evidenza i vantaggi di un doppio turno senza considerare tuttavia intervalli tra le singole ore di lezione ma solo un ampio intervallo tra i due turni con sanificazione giornaliera [Cammarata 2020].

## Metodologia e modello di rischio

Il modello di rischio contagio impiegato in questa analisi è quello di Gammaitoni-Nucci o modello GN [Gammaitoni 1997] adatto per ambienti chiusi e ventilati. Le ipotesi alla base del modello sono la perfetta e istantanea diluizione volumetrica di nuove cariche virali (perfect-mixing) e la conoscenza del parametro  $ER_q$  (cariche virali immesse all'ora da un soggetto infetto). In questa analisi verranno inoltre trascurati i contagi diretti per starnuto o colpi di tosse che si suppongono zero nel modello. Alla base dei modelli classici non a soglia come questo vi è inoltre l'assunto che la probabilità di contagio sia data dal rapporto  $C/S$  tra contagiati e soggetti esposti presenti nell'ambiente considerato, per cui la probabilità di contagio risulta indipendente dal numero di soggetti esposti. Questa approssimazione è riconducibile all'ipotesi di miscelazione perfetta e all'aver considerato solo il canale di trasmissione "indiretta" per aerosol (e non trasmissioni dirette per starnuti o respirazione ravvicinata tra soggetto A e B in prossimità). Nel modello GN infatti se sono presenti 10 o 100 persone nel volume considerato, ma la sorgente infettiva rimane una, la probabilità di contagio degli esposti a un fissato istante  $t$  intesa come rapporto  $C$  su  $S$ , dipenderà unicamente dalla concentrazione complessiva di cariche virali in ambiente  $n(t)$  e dal volume  $V$ . Tale probabilità segue una legge di saturazione esponenziale monotona crescente al crescere del tempo  $t$  di esposizione.

La probabilità di contagio durante un'ora di lezione dove siano presenti un soggetto positivo e  $n_0$  cariche virali pre-esistenti vale, secondo il modello GN:

$$R_{lez}(t) = 1 - e^{-\left[ \frac{p ER_q}{V} \frac{Nt + e^{-Nt} - 1 - \left( \frac{Nn_0}{ER_q} \right) e^{-Nt} + \left( \frac{Nn_0}{ER_q} \right)}{N^2} \right]} \quad (1)$$

per  $0 \leq t \leq t^{lez}$

Nella (1) si suppone che  $R_{lez}(0) = 0$ , ovvero che il rischio all'istante zero valga a sua volta zero (si noti che ciò è indipendente dal valore della carica iniziale  $n_0$ ). Il rischio di contagio  $R$  è influenzato dal rapporto di ventilazione  $p/NV$  (o equivalentemente  $p/Q$ ) — ove  $p$  è la portata media di inspirazione (nota anche come portata di ventilazione polmonare),  $N$  il numero di ricambi d'aria orari (vol/h) e  $Q$  la portata di aria di rinnovo non infetta (in  $\text{m}^3/\text{h}$ ) tramite ventilazione naturale o forzata. Si sottolinea come il modello sia inoltre particolarmente sensibile al valore del parametro  $ER_q$  (rate di emissione di cariche virali).

Durante un intervallo, se gli studenti escono dall'ambiente ove si è accumulata la nuvola di aerosol virale, è lecito supporre che non vi sia alcun innalzamento di  $R$  e che questo rimanga quindi costante, considerato anche che nei corridoi delle scuole, comunque ventilati, il numero di persone che stazionano per ore è trascurabile e l'eventuale

emissione da parte di soggetti positivi viene diluita normalmente in volumi complessivi più ampi delle singole aule. Il rischio di contagio durante i singoli intervalli è assunto quindi nullo:

$$R_{int}(t) = cost = 0 \quad (2)$$

per  $t^{f.lez} < t < t^{i.int}$

Il numero di contagi effettivi  $C$  sarà dato dal prodotto  $RS_0$  dove  $S_0$  indica il numero di suscettibili (o esposti) presenti in aula all'istante zero di inizio delle lezioni. A questo proposito si fa notare che ciò che interessa non è tanto il rischio contagio della singola  $i$ -esima ora di lezione  $R_{lez,i}(t)$  (che si azzererebbe dopo ogni intervallo) quanto il rischio cumulato  $R_{c,i}(t)$  alla medesima ora di lezione che tiene conto dello storico dei contagi:

$$R_{c,i}(t) = \frac{C_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} C_j(t)}{S_0} = R_{lez,i}(t - t_i^{i.n.lez}) + \sum_{j=1}^{i-1} R_{lez,j}(t_j^{f.lez} - t_j^{i.n.lez}) \quad (3)$$

Dove l'indice  $i$  copre tutti i cicli di (lezione + intervallo) e  $C_j(t)$  sono i contagi delle ore precedenti. L'ipotesi di fondo è che tutti i soggetti esposti iniziali  $S_0$  non cambino mai agli intervalli e durante tutte le ore di lezione.

Per meglio comprendere l'importanza del rischio cumulato facciamo un esempio. Se l'aula venisse completamente sanificata e l'aria completamente ricambiata durante il primo intervallo, sembrerebbe intuitivo far ripartire da zero il rischio della lezione successiva  $R_{lez,2}(t)$ . Tuttavia, in base alla definizione di rischio contagio dopo un tempo di esposizione  $t$  come rapporto  $C(t)/S_0$  (con  $C$  numero *totale* di contagiati all'istante  $t$ ), questo significherebbe azzerare il conteggio dei contagi avvenuti nelle ore precedenti, monitorando solo i nuovi contagi. Ma se con il fattore di rischio  $R$  vogliamo rispondere alla domanda: "che probabilità hanno  $S_0$  suscettibili iniziali di essere contagiati dopo  $tot$  ore di permanenza nello stesso ambiente?", dobbiamo certamente tenere in conto di tutta la frazione che si è contagiata dall'istante zero, ovvero del cumulo dei contagi  $C(t)$  e non solo di quelli avvenuti durante la singola ora di lezione. Ciò vale a maggior ragione se si vogliono confrontare le curve di rischio con le soglie di contagio di un gruppo classe definito di  $n$  studenti. Affinché avvenga almeno un contagio in classe il rapporto  $R = C/S$  deve valere almeno  $1/n$ . Quindi, per *escludere* un contagio durante tutte le ore di lezione, la condizione da porsi è sul rischio cumulato in classe:

$$R_c(t) < 1/n \quad (4)$$

(e non  $R_{lez,i}(t) < 1/n$ ), mentre la condizione per escludere  $k$  contagi sempre nella stessa classe sarà:

$$R_c(t) < k/n \quad (5)$$

### Effetto della mascherina chirurgica

Per tener conto dell'effetto di un DPI facciale (mascherina) nella riduzione sia delle cariche cumulate in aerosol che dell'ulteriore filtrazione nella fase di inalazione da parte dei soggetti esposti con mascherina, il tasso di inalazione virale  $ER_q p/Q$  nell'esponenziale in (1) andrebbe a sua volta moltiplicato per due fattori di riduzione percentuali (nell'ipotesi che tutti i soggetti esposti e il soggetto positivo indossino la mascherina, sempre tenendo presente l'approssimazione di perfetta miscelazione istantanea dell'aerosol nello spazio aula). Il primo fattore  $(1 - f_{out})$  è dovuto alla filtrazione dei quanta virali in ambiente dalla sorgente infettiva e il secondo fattore  $(1 - f_{in})$  è dovuto all'ulteriore eventuale potere filtrante del DPI in ingresso ai soggetti suscettibili. Per gli scenari senza mascherina ovviamente  $f_{in}$  e  $f_{out}$  sono pari a 0. In presenza di mascherina chirurgica il livello di filtrazione in ingresso  $f_{in}$  operato sugli esposti che la indossano assume valori differenti in letteratura. Taluni articoli come [Smereka 2020] lo indicano vicino a zero sostenendo che le chirurgiche filtrino solo le goccioline più larghe (macro-droplets  $> 5 \mu m$ ), ma più recenti misurazioni

tendono a mostrare una capacità delle chirurgiche di filtrare anche particelle sub-micrometriche in ingresso [Mueller 2020]. Data l'incertezza nella letteratura di riferimento, in questa sede si è assunto un range di variazione intermedio di  $f_{in} = (0-30\%)$  riportando curve di rischio per i due casi limite in Figura 1.

Per quanto riguarda la filtrazione in uscita dal soggetto infettivo, il parametro  $f_{out}$  potrebbe assumere un valore teorico anche del 95% [Leung 2020] in caso di chirurgica perfettamente aderente e costantemente indossata per tutto il tempo di esposizione. Per il contesto scolastico è stato tuttavia assunto un valore efficace più realistico di 85% che tenga conto della non perfetta adesione della mascherina e della possibilità di toglierla durante l'arco della mattinata (rispettando il distanziamento e rimanendo seduti al banco). Gli scenari valutati sono stati inoltre due: mascherina sempre indossata nell'arco delle 5 ore e mascherina indossata per il 50% del tempo (ricordiamo che il DM 39 2020 consentito fino al 4 novembre per le classi ancora in presenza di togliere la mascherina dal banco qualora fosse rispettato il distanziamento di 1 m tra le rime buccali).

### Ventilazione naturale nel modello GN

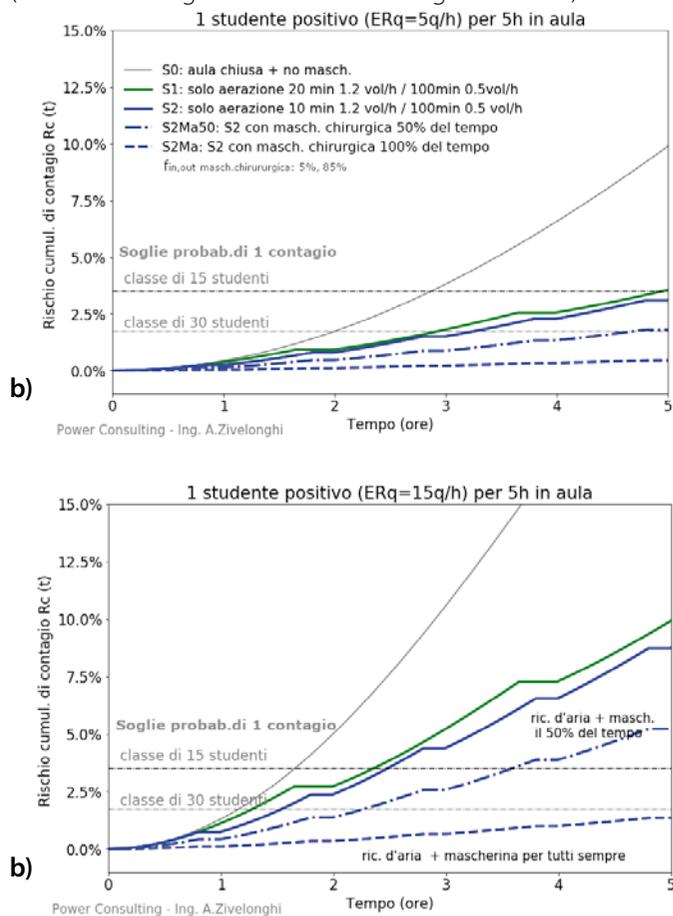
L'influenza della ventilazione naturale nel modello GN è data ovviamente dal parametro  $N$  nella (1) e nella (2). Va osservato come anche la ventilazione naturale e quindi  $N$  siano influenzati da numerosi altri fattori esogeni quali la differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno, la direzione e la velocità media del vento etc., nonché da fattori geometrici come l'ampiezza delle aperture, il rapporto aerilluminante delle aule, etc. [Marr 2012]. Ricordiamo inoltre che la taratura dei suddetti parametri che influenzano  $N$  possa differire da scuola a scuola e anche nelle diverse aule di uno stesso edificio scolastico (in base alla direzione dei venti e all'orientamento e ubicazione delle aule nello stesso edificio). In questa sede ci si limiterà ad associare alla modalità "ventilazione naturale" opportuni valori del parametro  $N$  per osservarne l'influenza quantitativa sul fattore di rischio  $R$ . In condizioni stazionarie di ventilazione naturale i valori di  $N$  riportati in letteratura sono generalmente compresi tra 0,2 e 1 vol/h con picchi anche di 1,5 vol/h (dati sperimentali basati su misurazioni della concentrazione di  $CO_2$  prima e dopo l'apertura delle finestre [Marr 2012, Escombe 2007]).

### Risultati delle simulazioni e discussione

I risultati delle simulazioni di  $R_c(t)$  in una tipica aula scolastica italiana di  $170 m^3$  ( $8 \times 7 \times 3$ , con 3 m di altezza minima consentita) sono riportati in Figura 1 e in Tabella 1 dove sono messi a confronto per due diversi valori del rate emissivo del soggetto infettivo ( $ER_q$ ). Le curve di Figura 1 si riferiscono alla situazione di uno studente positivo in classe con tempo di permanenza di 5 ore nello stesso gruppo classe, confrontando diversi scenari di mitigazione del rischio basati su ventilazione naturale e utilizzo della mascherina. Durante ogni intervallo si è ipotizzato una maggiorazione del tasso di ventilazione naturale da 0,5 a 1,2 vol/h mediante la completa apertura delle finestre e della porta dell'aula. Si è scelto un valore relativamente basso di 1,2 vol/h per tenere conto del fatto che molte aule scolastiche non hanno un rapporto aero-illuminante tale da consentire un veloce ricambio d'aria, anche a finestre completamente aperte. Come evidente dallo scostamento delle curve continue rispetto alla curva teorica di riferimento (aula non ventilata e senza mascherine), l'impatto positivo su  $R$  della sola ventilazione naturale dovuta all'apertura regolare delle finestre è rilevante e quantificabile in una riduzione media di quasi il 50% anche con valori conservativi di  $N$ . L'ulteriore importante effetto di mitigazione dovuto alla mascherina chirurgica (indossata da tutti i soggetti suscettibili e dal soggetto positivo) è quantificabile

in una riduzione addizionale variabile dal 30 al 45% (curve blu tratteggiate) a seconda che venga effettivamente tenuta per tutto il tempo di esposizione o soltanto per una frazione di esso (scenario più realistico). L'effetto combinato di mascherina più ventilazione naturale potrebbe quindi abbassare il rischio cumulato di contagio di circa l'80%, con ovvia dipendenza anche dal parametro V (volume dell'aula, qui assunto costante e rappresentativo di una situazione intermedia tipica). Inoltre, l'adozione di intervalli di ricambio d'aria più brevi ma più frequenti, consentirebbe un'ulteriore riduzione di R rispetto all'apertura ogni due ore (confronto tra curva blu e verde continue in Figura 1). In Tabella 1 anche il valore di  $R_c$  nel caso di un docente positivo in cui si è assunto un tempo di permanenza in aula di 2h comprensivo di intervallo (tempo medio per un docente di scuola superiore).

È importante notare che per escludere completamente un contagio in classe negli scenari considerati, la condizione (4) deve essere soddisfatta. Questo significa, in una tipica classe di istituto superiore di 25 alunni, che il valore di  $R_c$  dovrebbe rimanere inferiore a  $1/25 = 4\%$ . Tale soglia si riduce al 3,3% con classi da 30 alunni (purtroppo ancora presenti per l'A.S. 2020/21 nonostante i propositi di riduzione del MIUR) mentre si innalzerebbe al 6,7% con classi piccole di 15 alunni, con indubbi vantaggi sulla gestione del rischio contagio. In Tabella 2 sono riportati i contagi indiretti dopo 5h di lezione per vari livelli di numero studenti per classe (da 15 a 30) considerando i due valori di  $ER_q$ , e l'ipotesi realistica di mascherina tenuta per il 50% del tempo (oltre che di adeguata ventilazione ad ogni intervallo).



**Figura 1** – Curve di rischio cumulato di contagio aereo indiretto in funzione del tempo di esposizione secondo il modello monozona dinamico GN considerando diversi scenari di mitigazione in una tipica aula scolastica italiana di scuola superiore (volume aula 170 m<sup>3</sup>). a) Scenari calcolati con  $ER_q = 5$  quanta/h. b)  $ER_q = 15$  quanta/h

Figure 1 – Cumulative risk curves of indirect airborne transmission as a function of exposure time according to the single-zone dynamic GN model considering a standard classroom in Italian high-schools ( $V=170\text{ m}^3$ ). a) Scenarios calculated with  $ER_q=5$ . b)  $ER_q = 15$  quanta/h

**Tabella 1** – Stime di rischio di contagio indiretto dopo 5h di esposizione nei casi distinti di studente o docente come sorgente virale in funzione di diversi valori assunti del tasso  $ER_q$  di produzione di cariche virali ( $V=170\text{ m}^3$ , ventilazione naturale permanente con intervalli di 10 min di apertura completa di porte e finestre ogni 50 min). Il campo di variazione di  $ER_q$  è compatibile con soggetto a riposo o in piedi con attività di parola desunto da [Buonanno 2020] e riportato in Figura 3

Table 1 – Risk estimations in the case of student or teacher as viral source, as a function of possible values of the  $ER_q$  parameter ( $V=170\text{ m}^3$ , permanent natural ventilation, window+door full opening intervals of 10 min every 50 min). The  $ER_q$  range of variation (quanta  $h^{-1}$ ) is compatible with values from resting/standing individual during voice counting activity in [Buonanno 2020] and shown in Figure 3

Sorgente infettiva	Tempo di permanenza in aula [h]	Utilizzo DPI	Ricambi d'aria [vol h <sup>-1</sup> ]	$ER_q$ [quanta h <sup>-1</sup> ]	R5h
Studente	5h	SI	0,5 (1,2)	5	<1%
Studente	5h	SI	0,5 (1,2)	30	<b>4,1%</b>
					<b>R2h</b>
Docente	2h	SI	0,5 (1,2)	30	1,3%
Docente	2h	NO	0,5 (1,2)	30	7,4%*
Docente	2h	SI	0,5 (1,2)	80	<b>3,2%</b>

**Tabella 2** – Stime di probabili contagi indiretti dopo 5h di lezione per vari livelli di studenti per classe (ipotesi: mascherina indossata per il 50% del tempo da tutti i presenti incluso il soggetto positivo) secondo il modello monozona GN dinamico. I due scenari si riferiscono a due diversi valori medi del tasso di produzione di carica virale ( $ER_q$ ) da parte di uno studente positivo in aula da 170 m<sup>3</sup>

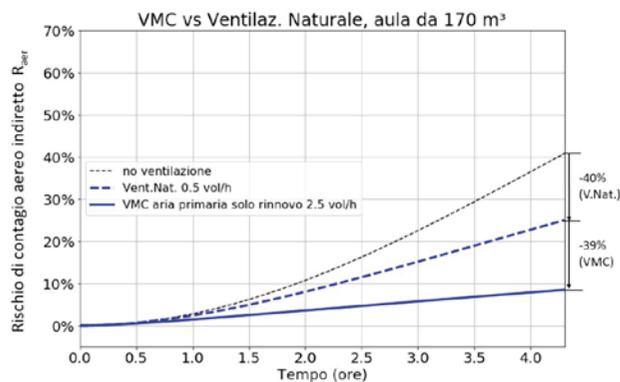
Table 2 – Number of probable indirect infections after 5h of lecture at different levels of students per classrooms (hyp: face mask for 50% of the lecture time) according to the dynamic GN single-zone mode. The two scenarios refer to two different average levels of viral load rate  $ER_q$  from a positive student in a classroom of 170 m<sup>3</sup>

n studenti per classe	Soglia di rischio per 1 contagio indiretto	Contagi indiretti dopo 5h di esposizione	
		Scenario ottimista ( $ER_q = 5$ )	Scenario pessimista ( $ER_q = 15$ )
30	3,3%	1	2
25	4,0%	0	1
20	5,0%	0	1
15	6,7%	0	0

**Influenza del parametro  $ER_q$**

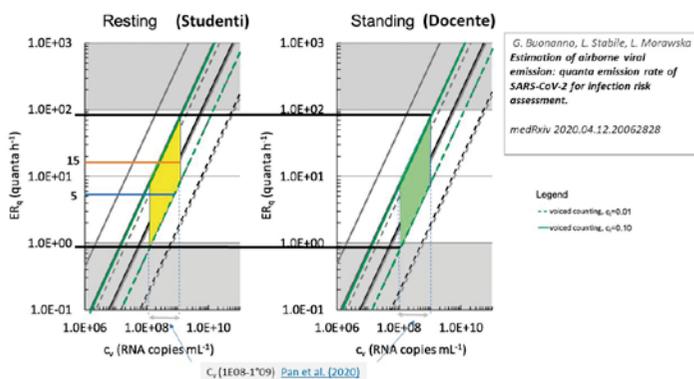
È importante evidenziare la criticità della scelta del parametro  $ER_q$  nel modello. Recentissimi studi [Buonanno 2020] indicano un ampio campo di variabilità per tale parametro, in particolare tra 0,9 e 90 quanta/h per soggetto parlante (con minima variazione tra seduto o in piedi). Ciò in forte dipendenza da due ulteriori parametri virologici  $C_v$  e  $C_i$ , come mostrato in Figura 3. Il range di variazione di  $C_v$  per il virus SARS-CoV-2 è indicato da recenti pubblicazioni tra  $10^8$  e  $10^9$  [Pan 2020], mentre il range di variazione di  $C_i$  si colloca tra  $10^{-2}$  e  $10^{-1}$  per coronavirus di tipo SARS [Watanabe 2010]. Come evincibile dalla Figura 3, la scelta dei due valori di  $ER_q$  nel caso di studente infettivo (ricordando che si tratta di valori medi nell'arco delle 5 ore) appare consistente con quella di soggetto moderatamente attivo nell'attività verbale (interrogazioni, interventi, interlocuzioni con il docente, conversazioni con i compagni, etc.). Tuttavia, proprio a causa dell'incertezza e dell'alta variabilità del parametro  $ER_q$  (zona rombica gialla),

in questa analisi si sono scelti due valori distanti ma intermedi (pessimista  $ER_q = 15$  e ottimista  $ER_q = 5$ ), in quanto valori estremamente alti o bassi appartengono a situazioni limite che non si verificano costantemente nell'arco dell'intera permanenza in aula (ad esempio parlare a voce particolarmente alta/ cantare o al contrario a voce particolarmente bassa/sussurrare). Altri valori di  $ER_q$  sia per il caso docente che studente positivo, sono indicati in Tabella 1 al fine di mostrare la sensibilità di  $R$ . Al caso del docente positivo vanno necessariamente fatti corrispondere valori medi più elevati, in quanto il soggetto docente parla percentualmente molto più a lungo durante la lezione. Si evidenzia inoltre come lo scenario di docente privo di mascherina comporti un netto superamento della soglia di rischio del 4% (almeno un contagio in classe mediamente numerosa) anche per un basso valore di  $ER_q$ .



**Figura 2 – Confronto tra curve di rischio nel caso di ventilazione naturale costante e ipotesi di dotare la stessa aula scolastica di impianto ad aria primaria permanentemente acceso a 2.5 ricambi ora con solo rinnovo (senza ricircolo e senza filtrazione in impianto)**

Figure 2 – Comparison between the case of constant natural ventilation and the case of constant mechanical ventilation (without recycling and without mechanical filtration systems)



**Figura 3 – Campo di variazione del parametro ERq per soggetto parlante a riposo e in piedi come riportato in [Buonanno 2020]. Le rette blu e arancio evidenziano i due valori scelti per le simulazioni**

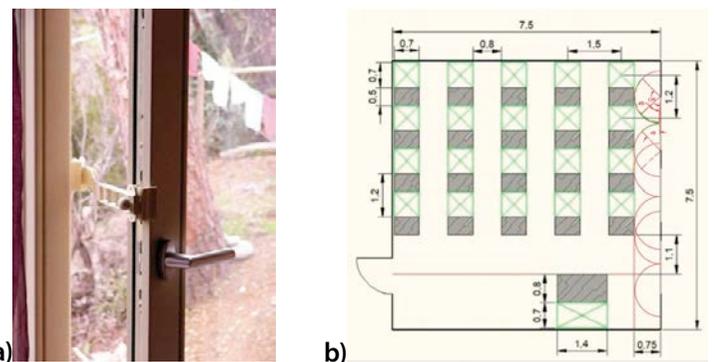
Figure 3 – Range of variation for  $ER_q$  for resting and standing individual. The two values chosen in the present study are highlighted from the straight line in blue and orange

**Ventilazione Naturale vs Sistemi VMC nelle scuole**

Gli impianti di VMC operati secondo le prescrizioni AICARR (ovvero con apporto di sola aria di rinnovo, estrazione di aria viziata ed esclusione del ricircolo) possono offrire un indubbio vantaggio: il superamento dei bassi valori di  $N$  tipici della ventilazione naturale e tenere così bassi i valori di  $R$  come già mostrato in [Vio 2020]. Come mostrato nella Figura 2, ad esempio un innalzamento dei ricambi d'aria da 0,5 a 2,5 vol/h potrebbe portare a una mitigazione teorica addirittura doppia del rischio contagio nello stesso ambiente. Preme tuttavia

evidenziare un aspetto delicato degli impianti ad aria: se a un innalzamento della portata di rinnovo corrispondesse un innalzamento eccessivo della velocità locale dell'aria in alcuni punti dell'aula, con eventuale formazione di zone di turbolenza, si potrebbe incorrere nell'effetto indesiderato di favorire la diffusione di microparticelle virali da un soggetto infettivo A a uno suscettibile B posto nella direzione della corrente d'aria. Tali fenomeni devono quindi essere assolutamente scongiurati o almeno limitati mediante un'opportuna progettazione e taratura dell'impianto, in particolare per scuole di futura costruzione o di più imminente ristrutturazione.

Viene infine osservato come un ostacolo per l'apertura delle finestre (e quindi un ostacolo per una corretta ventilazione naturale) sia costituito dall'eventuale presenza nelle aule scolastiche di banchi collocati lungo le pareti finestrate nelle configurazioni risultanti dall'alloggiamento di classi numerose e dall'ossequio sia di norme di distanziamento che di sicurezza (vie di fuga). Una possibile configurazione a norma per 20 studenti in aula da 7,5 x 7,5 m che favorisca l'aerazione mediante ventilazione naturale, è quella proposta nel manuale operativo della Regione Veneto (Figura 4b), ove una opportuna distanza di 75 cm dalla parete finestrata è stata indicata al fine di consentire l'apertura agevole delle finestre a battente.



**Figura 4 – a) Esempio di ferma-finestra economico ad apertura regolabile. b) Possibile layout per aula di 20 alunni + docente per scuole secondaria di I° e II° grado soddisfacente il requisito di apertura agevole delle finestre [RV 2020]**

Figure 4 – a) Example of inexpensive and tunable windows opener b) Possible classroom layout for 20 scholars + 1 teacher in schools as proposed in the 2020 Operational Restart Guidelines of Veneto Region [RV 2020]

**Quanto spesso e quanto a lungo dovranno aprirsi porte e finestre?**

Considerando il concorrente effetto di discomfort dovuto alle temperature più fredde e il rischio di ammalarsi di altre patologie è necessaria una soluzione di compromesso: durante le lezioni sarebbe raccomandabile che le finestre vengano tenute sempre almeno parzialmente aperte (ad esempio mediante economici apri-finestra regolabili per le finestre a battente come mostrato nella Figura 3a), per poi essere aperte totalmente ad ogni cambio di ora con gli alunni che lasciano l'aula per almeno 10 minuti, come indicato negli scenari S2 ed S2M di Figura 1. Ogni soluzione andrebbe tuttavia contestualizzata nei diversi edifici scolastici alle diverse latitudini del paese. Al centro nord una soluzione alternativa potrebbe essere costituita dalla sola apertura durante gli intervalli di almeno 10 minuti, a patto che le sole finestre spalancate garantiscano una portata di rinnovo sufficientemente elevata. Se questa è troppo bassa la curva di rischio cumulato non si abbassa sufficientemente dai valori elevati in mancanza di ventilazione (prima curva di Figura 1 in grigio). Data la delicatezza della questione, anche una campagna di verifica in situ della portata massima di ventilazione naturale in ogni aula di tutti gli edifici superiori

interessati non è escludibile e sarebbe anzi auspicabile.

Vanno inoltre valutati caso per caso gli effetti della concomitante apertura delle porte delle aule (oltre che delle finestre) Questa operazione che normalmente concorre ad innalzare la portata di rinnovo, potrebbe altresì dar luogo a correnti d'aria indesiderate verso corridoi

interni non aerati trasportando ivi parte della carica virale. In alternativa si potrebbe valutare l'apertura delle porte delle aule garantendo parimenti l'aerazione di tutti i corridoi contigui (ove possibile), vietando lo stazionamento degli alunni nei corridoi non aerati dell'edificio (in particolare durante gli intervalli).

## Conclusioni

Dopo la conferma per l'A.S. 2020/21 di classi molto numerose (anche di 30 alunni) e ormai nel pieno della stagione invernale, il rischio di contagio aereo a grande distanza nelle aule scolastiche italiane purtroppo è concreto, anche se certamente mitigato dai numerosi controlli in atto per scongiurare l'ingresso di persone positive. Purtroppo, l'esigenza di riscaldare le aule nella stagione invernale (per la maggior parte dei casi dotate di impianti a termosifoni senza impianti per il ricambio d'aria) porterà a una naturale tendenza ad aprire meno frequentemente le finestre durante le lezioni. Questa appare una forte criticità per la ripresa delle attività in presenza. Per i motivi esposti, infatti, è assolutamente raccomandabile l'apertura regolare delle finestre ad ogni ora per almeno 10 minuti anche nei mesi più freddi, e anzi, laddove il rapporto aeroilluminante dell'aula sia particolarmente basso, è fondamentale garantire una apertura minima costante (a vasistas o mediante ferma-finestre), al fine di garantire una diluizione costante della carica virale in ambiente.

Come evidenziato dai risultati delle simulazioni, sebbene condotte con un modello monozona semplificato, solo la combinazione di un frequente ricambio d'aria e di mascherine chirurgiche indossate il più a lungo possibile da parte di tutte le persone presenti nelle aule, può abbassare il rischio di contagio indiretto nelle scuole a livelli di sicurezza (dando ovviamente per scontato le regolari operazioni di sanificazione che mitigano il canale di contagio per contatto superfici infette).

Ovviamente le approssimazioni del modello utilizzato sono molte

e vi è ancora incertezza nella determinazione di alcuni parametri fondamentali, in particolare l'assegnazione di valori corretti del parametro  $ER_q$  nella situazione specifica. Tuttavia, anche la variazione parametrica di  $ER_q$  con valori compatibili con la recente letteratura scientifica, porta alle medesime raccomandazioni in ottica prudenziale e cautelativa.

È infine parimenti cruciale, come evidenziano sempre i risultati delle simulazioni oltre che il buonsenso, perseguire politiche di riduzione del numero di studenti per classe. Questo, oltre a garantire un migliore apprendimento sia in presenza che a distanza, appare essenziale nel contesto drammatico di necessità di ripresa delle attività scolastiche in presenza e di contemporanea gestione del rischio di contagio aereo indiretto. Si è visto infatti in questa analisi, che a parità di livello di rischio una classe più numerosa rischierà di avere più contagi per via indiretta a fine giornata, non solo per l'innalzamento della probabilità di positivi nel gruppo, ma proprio per la natura volumetrica di questo possibile canale di contagio. Una possibile soluzione di compromesso dal punto di vista della mitigazione di questo canale di contagio è il ricorso alla cosiddetta "DaD a rotazione" ovvero attività in presenza e a distanza a giorni alterni mediante costituzione di sottogruppi all'interno dello stesso gruppo classe. Questa modalità (da non confondersi con quella di alternare classi intere in presenza e a distanza), consentirebbe una riduzione sensibile del numero di studenti in presenza nella stessa aula e nell'intero edificio (fino al 50%) e quindi un conseguente abbassamento del rischio di contagio aereo indiretto.

## RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia l'Ing. Michele Vio e i prof. Gianpaolo Beretta e Giorgio Buonanno per i preziosi suggerimenti e discussioni.

## CONFLITTO DI INTERESSI

Nell'articolo presentato non sussistono conflitti di interesse di ordine economico o di altro tipo.

## REFERENCES

- Leung, N.H.L., Chu, D.K.W., Shiu, E.Y.C. et al. Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. *Nat Med* 26, 676–680 (2020).
- Lidia Morawska, Donald K Milton, It is Time to Address Airborne Transmission of COVID-19, *Clinical Infectious Diseases*, ciae939 (2020).
- Lidia Morawska, Julian W. Tang, William Bahnfleth et al. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?, *Environment International*, Volume 142, 2020,105832,ISSN 0160-4120 (2020).
- Escombe AR, Oeser CC, Gilman RH, et al. Natural ventilation for the prevention of airborne contagion. *PLoS Med.* 4(2):e68. (2007).
- AiCARR Protocollo per la riduzione del rischio da diffusione del SARS-CoV-2 nella gestione e manutenzione degli impianti (2020).
- G.Cammarata, Probabilità di contagio a grande distanza per via aerea da SARS-CoV-2 nelle scuole italiane. *AiCARR Journal* #63, n. 4, 37-49, 2 (2020).
- Gammaitoni L., Nucci M.C. Using a mathematical model to evaluate the efficacy of TB control measures. *Emerging Infectious Disease*, 3, 335-342. (1997).
- Knibbs LD, Morawska L, Bell SC, Grzybowski P. Room ventilation and the risk of airborne infection transmission in 3 health care settings within a large teaching hospital. *Am J Infect Control.* 2011 Dec;39(10):866-72.
- Smereka, J., Ruetzler, K., Szarpak, L., Filipiak, K. J., & Jaguszewski, M. Role of mask/respirator protection against SARS-CoV-2. *Anesthesia and analgesia*, 10.1213/ANE.0000000000004873 (2020).
- G. Buonanno, L. Stabile, L. Morawska. Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment, *Environment International*, Volume 141,(2020), 105794, ISSN 0160-4120.
- Pan, Y., Zhang, D., Yang, P., Poon, L. L. M., & Wang, Q. Viral load of SARS-CoV-2 in clinical samples. *The Lancet Infectious Diseases*, 20(4). (2020).
- T. Watanabe, T.A. Bartrand, M.H. Weir, T. Omura, C.N. Haas. Development of a dose-response model for SARS coronavirus *Risk Anal.*, 30 (2010), pp. 1129-1138, 10.1111/j.1539-6924.2010.01427.x
- Amy V Mueller, Matthew J. Eden, Jessica J. Oakes, Chiara Bellini, Loretta A Fernandez. Quantitative Method for Comparative Assessment of Particle Filtration Efficiency of Fabric Masks as Alternatives to Standard Surgical Masks for PPE edRxiv 2020.04.17.20069567.
- Li Y, Leung GM, Tang JW, Yang X, Chao CY, et al. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment—A multidisciplinary systematic review. *Indoor Air* 17: 2–18. (2007).
- Marr, David; Mason, Mark; Mosley, Ron; Liu, Xiaoyu. The influence of opening windows and doors on the natural ventilation rate of a residential building. *The Free Library* (2012 January, 1).
- Michele Vio, Gli impianti di climatizzazione e il rischio di contagio. *AiCARR Journal* #61, n. 2, 34-40 (2020).
- Piano Ripartenza Regione Veneto 2020/21, Manuale Operativo - a cura della Direzione Regionale Ministero dell'Istruzione Ufficio Scolastico Regionale per il Veneto (6/7/2020).