

Giuliano Cammarata <sup>1\*</sup>

# Probabilità di contagio a grande distanza per via aerea da SARS-CoV-2 nelle scuole italiane

## *Probability of aerial long-distance infection from SARS-CoV-2 in Italian schools*

<sup>1</sup>Università degli Studi di Catania, Catania, Italia**\*Corresponding author:****Giuliano Cammarata**

Già appartenente al Dipartimento di Ingegneria Elettrica Elettronica e Informatica  
 Università degli Studi di Catania  
 Via Galermo 166b  
 95123 Catania, Italia  
 cammaratagiuliano@gmail.com  
 tel +39 348 3334496

DOI:10.36164/AiCARRJ.63.04.02

**Sommario**

Il problema della trasmissione del contagio virale da SARS-CoV-2 per via aerea riveste una grande importanza in ambienti chiusi, quali sono le aule scolastiche.

Si presenta uno studio su tre casi esempio: aula per scuola primaria, aula per scuola media e aula per scuola secondaria. Le differenze fra le tre tipologie attengono l'età degli alunni, la loro attività respiratoria, le esigenze di ventilazione di aria esterna che, per il D.M. del 1975 sulle scuole, dovrebbe essere garantita da numeri di ricambio d'aria pari, rispettivamente, a 2,5, 3,5 e 5 Vol/h.

Lo studio è stato effettuato con una variante del metodo di Rudnick e Milton con calcolo dinamico discretizzato per rispondere ai profili d'uso per ciascuna tipologia scolastica. Si presentano due profili d'uso per ciascuna scuola: turno di lezioni unico, eventualmente tempo pieno con mensa intermedia, e doppio turno con e senza sanificazione intermedia.

I risultati sono particolarmente interessanti per tutti i tipi di scuole, specialmente per la stragrande maggioranza (stimata nel 95%) di istituti scolastici privi di ventilazione meccanica. Il confronto delle probabilità di contagio individuale e globale è fatto per numero di ricambi orari pari a 0,5, 1 e il valore di norma (2,5, 3,5 o 5 Vol/h) per ciascuna tipologia scolastica.

Le conclusioni generali sono di rischio tanto più elevato, nel caso di ventilazione meccanica assente, quanto maggiore è il numero di ore di permanenza nelle aule. Si consiglia l'adozione di ore ridotte a 30-40 minuti per un tempo totale, per ciascun turno di 3-4 ore al massimo. Le ore di lezioni mancanti possono essere svolte mediante Didattica a Distanza (DAD).

In appendice si presenta lo sviluppo teorico del metodo di Rudnick e Milton modificato con l'introduzione dell'analisi dinamica discretizzata e con l'utilizzo dei profili d'uso. Si presentano le basi teoriche del metodo che risulta innovativo rispetto agli altri metodi conosciuti. Esso, infatti, si riferisce direttamente al numero di persone presenti

**Abstract**

The problem of the aerial viral transmission from SARS-CoV-2 is of great importance in closed environments, such as school classrooms. A study is presented on three example cases: classroom for primary school, classroom for middle school and classroom for high school. The differences between the three typologies concern the age of the students, their respiratory activity, the air ventilation needs with reference to the 1975 D.M. (Ministerial Decree) on schools: according to this decree it should be guaranteed an air change per our (ACH) equal, respectively, to 2.5, 3.5 and 5 Vol/h.

The study was carried out using a variant of the Rudnick and Milton method with the addition of a dynamic discretized calculation to respond to the specific usage profiles for each type of school. Two usage profiles were examined for each type of school: single round of lessons and double round of lessons with intermediate interval, or double lessons with and without intermediate disinfection of the rooms. The results are particularly interesting for all types of schools, especially for the vast majority (estimated 95%) of Italian schools without controlled mechanical ventilation (CMV). The comparison of the probability of individual and global contagion is made for the number of ACH equal to 0.5, 1 and the previewed normal value (2.5, 3.5 or 5 Vol/h) for each school type. The general conclusions are of greater risk, in the case of no mechanical ventilation, The greatest risk arises with the increase in the number of hours spent in the classrooms. We recommend adopting the hour reduced to 30-40 minutes for a total time of 3-4 hours for each round of lessons. Missing hours of lessons can be carried out through Distance Learning (DL).

The appendix presents the theoretical development of the modified Rudnick and Milton method with the discretized dynamic analysis with user profile. The theoretical bases of the innovative method are presented with respect to the other known methods. In fact, this method refers directly to the number of people present

negli ambienti, alla loro attività respiratoria e all'utilizzo della CO<sub>2</sub> quale marcatore dell'attività di espirazione e di successiva respirazione (re breathing) da parte dei soggetti suscettibili di contagio e dallo stesso soggetto infetto. Il metodo adottato segue la forma classica della distribuzione di Poisson, così come gli altri metodi. L'analisi dinamica discretizzata consente di effettuare il calcolo del rischio di contagio con maggior precisione rispetto ai metodi statici, aggiornando i valori dei parametri di calcolo ad ogni passo temporale (qui assunto 0,05 h) e calcolando il valore medio dei parametri di calcolo che lo richiedono.

L'uso dei profili d'uso rende il metodo facilmente adattabile alle reali condizioni di utilizzo delle aule o degli ambienti di lavoro in generale.

#### Parole chiave:

- ▶ COVID-19
- ▶ Metodo di Rudnick & Milton
- ▶ Modello dinamico per il rischio di contagio aereo
- ▶ Profili d'uso
- ▶ CO<sub>2</sub> come marcatore dell'aria espirata, respirazione dell'aria espirata

in the rooms, their respiratory activity and the use of CO<sub>2</sub> as a marker of the exhalation and subsequent breathing activity (re breathing) by subjects susceptible to contagion and by the infected subject. The method follows the classical form of the Poisson distribution, as well as the others cited. The discretized dynamic analysis makes it possible to calculate the risk of contagion with greater precision than static methods, updating the values of the calculation parameters at each time step (here assumed 0.05 h) and calculating the average value of certain parameters accordingly. The use of user profiles makes the method easily adaptable to the real conditions of use of the classrooms or other environments in general.

#### Keywords:

- ▶ COVID 19
- ▶ Rudnick & Milton method
- ▶ Dynamic model for the risk of airborne contagion
- ▶ Usage profile
- ▶ CO<sub>2</sub> as a marker of exhaled air
- ▶ Re breathing

## Il problema del contagio virale aereo

Nel 1934, appena due anni dopo la scoperta dei virus con i primi microscopi elettronici, Wells [1] ipotizzò che il meccanismo di trasmissione delle malattie virali per via aerea fosse dovuto all'emissione, da parte dei soggetti infetti, di piccolissime goccioline di liquido organico provenienti dall'esofago, dette droplet, contenenti nuclei virali (RNA) in numero sufficiente a provocare il contagio nel caso di inalazione diretta tramite bocca o naso e per contatto indiretto dalle superfici sulle quali i droplet si depositano per gravità, dopo aver percorso una distanza variabile fra 1 e 2 m.

L'emissione di droplet può avvenire per respirazione, per parlato, per colpi di tosse e attraverso starnuti. Il numero di droplet varia da poche decine a qualche migliaio per la respirazione e il parlato (non ad alta voce), fino a 30.000 droplet per gli starnuti e fino a 200 milioni per i colpi di tosse.

Anche le velocità di emissione e le distanze percorse dai droplet variano statisticamente secondo questi criteri:

- da 2 a 4 m/s per la respirazione e il parlato normale, con una distanza da 1 a 2 m prima che cadano per gravità a terra o sulle superfici incontrate;
- da 20 a 40 m/s per colpi di tosse, con distanze fra 2 e 6 m prima della caduta per gravità sulle superfici;
- da 60 a 80 m/s per starnuti, con distanze superiori a 6 m prima della caduta per gravità sul terreno o altre superfici.

Quanto osservato è sufficiente a comprendere l'importanza sia del distanziamento interpersonale, che dell'utilizzo delle mascherine (almeno di tipo chirurgico) e della sanificazione delle superfici.

La raccomandazione di lavare spesso le mani è importante per ridurre il contagio indiretto di cariche virali assorbite per contatto con superfici infette e riportate nella bocca, nel naso o nelle mucose degli occhi.

Sono dunque opportune e necessarie le misure anti contagio proposte dall'ISS (Istituto Superiore di Sanità) e fatte proprie dai vari ministeri. Occorre rispettarle pedissequamente, in modo convinto e responsabile da parte di tutti, cercando di evitare momenti di disattenzione o di sospensione della vigilanza attiva, ad esempio, togliendo per brevi periodi le mascherine, avvicinandosi oltre la distanza di sicurezza e/o non lavando le mani frequentemente.

Queste misure, che i virologi hanno studiato da anni, riguardano la probabilità di contagio a breve distanza, cioè entro 1,2 m dal soggetto infetto, e valgono in qualunque circostanza, sia all'aperto che al chiuso.

Sono sistemi di protezione che hanno dato prova di buon funzionamento e grazie ad essi siamo stati in grado di superare la cosiddetta Fase 1 (lockdown) dall'inizio di marzo a maggio 2020.

Ma la trasmissione del contagio da SARS-CoV-2 avviene anche per via aerea attraverso la formazione di nuclei di droplet per effetto della rapida evaporazione in aria dopo pochi secondi dall'emissione dei droplet.

Le goccioline iniziali, delle dimensioni di decine di micrometri, sono anche più pesanti e si comportano come piccoli proiettili formando una parabola e ricadendo verso il basso per gravità. I droplet evaporati hanno dimensioni di qualche micrometro, sono leggerissimi (qualche nanogrammo) e tali da formare una sorta di nuvola leggera, detta aerosol di nuclei di droplet (come dimostrato da Wells) che permane in sospensione nell'aria per alcune ore.

I virologi di solito non accettano che anche gli aerosol possano trasmettere il contagio perché ritengono che, date le piccolissime dimensioni, questi non vengano trattenute negli alveoli e non diano origine ad una infezione. 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 [2].

Lindsay [3] ha verificato che le percentuali di provenienza del virus dell'influenza da una persona infetta che tossisce si ha secondo questa suddivisione:

- 42% da droplet con dimensioni < 1 µm;
- 23% da droplet con dimensioni fra 1 e 4 µm;
- 35% da droplet con dimensioni > 4 µm.

Già gli studi di Florence Nightingale (1859), nel Regno Unito, avevano dimostrato che il contagio della tubercolosi, male endemico dell'Ottocento dovuto al bacillo di Koch, si riduceva molto in presenza di una adeguata ventilazione d'aria fresca esterna nelle sale di degenza ospedaliera. Proprio da quest'osservazione, di natura puramente statistica, si cominciarono a progettare e costruire ospedali con buona ventilazione naturale e con una disposizione dei letti di degenza congruente con le osservazioni fatte.

A partire dal 1957 gli studi di Wells, O'Connor e Riley dimostrarono una stretta correlazione fra le probabilità di contagio nei locali chiusi, con il morbillo e negli anni successivi, con tutti i virus conosciuti (SARS,

MERS, Influenza). Di recente, lo scorso luglio, 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 (Organizzazione Mondiale della Sanità) rispondeva ufficialmente con una conferma anche del possibile contagio a grande distanza.

Desidero evidenziare con opportune simulazioni, basate su relazioni di calcolo della probabilità del contagio aereo già consolidate dal 1956 ad oggi, i rischi possibili per gli alunni che rientrano a scuola in condizioni di aereazione non sufficiente.

## Cenni sul calcolo della probabilità personale di contagio per via aerea

Maggiori dettagli sui metodi di calcolo delle probabilità di contagio per via aerea sono esposti in Appendice per coloro che desiderano approfondire questi argomenti e comprendere meglio la metodologia di calcolo adottata nelle simulazioni. Solo a scopo euristico si presenta una breve introduzione al problema.

Dalla considerevole mole di pubblicazioni scientifiche sul contagio virale aereo emergono tre metodi di calcolo della probabilità personale di contagio:

1. Relazione di Wells-Riley del 1978[4];
2. Relazione di Gammaitoni-Nucci, del 1993[5];
3. Relazione di Rudnick-Milton del 2003.

Tutte esprimono la probabilità di contagio in una forma matematica che segue la curva distribuzione statistica del contagio di Poisson. Esse, pertanto, sono tipicamente espresse nella forma:

$$P = 1 - e^{-\mu} \quad (1)$$

ove  $P$  è la probabilità di contagio e  $\mu$  è il fattore di Poisson espresso in ciascun metodo con forme matematiche conformi alle impostazioni teoriche adottate. Nel fattore  $\mu$  entrano in gioco alcune grandezze fondamentali, quali:

- l'attività di respirazione del singolo individuo, in  $m^3/h$  di aria ambiente, indicata usualmente con la lettera  $p$ ;
- il numero di infetti iniziali, solitamente pari a 1, indicato con la lettera  $i$ ;
- il tempo di esposizione a partire dall'ingresso nell'ambiente, indicato con la lettera  $t$ , (ore);
- la portata totale di aria fresca,  $Q$  (in  $m^3/h$ ), calcolata come prodotto nel numero di ricambi orari,  $N_r$  (in Vol/h), per il volume,  $V$  (in  $m^3$ ), dell'ambiente;
- il numero dei quanta di infezione, espresso in quanta/h, prodotti dall'infetto all'interno dell'ambiente. Questa grandezza ha una definizione epidemiologica e racchiude in sé due informazioni fondamentali: il numero di cariche virali e il termine di infettività, cioè la probabilità che la carica virale inizi un'infezione. In pratica vale la relazione per i quanta ( $q$ ):
  - $q =$  termine di infettività  $\times$  numero di quanti / tempo unitario

Ad esempio, la relazione di Wells-Riley, la più semplice fra le tre citate, è:

$$P = 1 - e^{-\left(\frac{i \cdot q \cdot p \cdot t_{exp}}{N_r \cdot V}\right)} \quad (2)$$

e possono facilmente riconoscersi le grandezze sopra descritte.

Per tutte e tre le metodologie di calcolo si possono fare le seguenti importanti considerazioni, ceteris paribus:

1. la probabilità di contagio individuale decresce al crescere del volume dell'ambiente;
2. la probabilità di contagio individuale decresce al crescere del numero di ricambi orari di aria fresca esterna;
3. la probabilità di contagio individuale cresce con l'aumentare del tempo di esposizione a partire dal momento di ingresso nell'ambiente.

La prima osservazione dipende da variabili architettoniche, il volume

dell'ambiente, sulle quali possiamo intervenire ben poco. Pertanto, in ambienti piccoli è bene permanere per meno tempo possibile.

La seconda osservazione dipende dalla ventilazione dell'aria fresca esterna. Questa può essere di due tipi:

- Ventilazione naturale, attraverso aperture (porte e finestre) che innescano un moto convettivo fra ambiente esterno ed ambiente interno. È ciò che facciamo tutti i giorni per areare i nostri ambienti quando manca un impianto di ventilazione meccanica. Questa ventilazione dipende, quindi, dalle differenze di pressione e di temperatura fra interno ed esterno. È semplice, economica ma non garantisce una ventilazione sufficiente quando gli ambienti ospitano più di due persone (stanze per abitazioni). In questo caso è sufficiente ricambiare l'aria con una portata che si è soliti esprimere in Vol/h, detto numero di ricambi orari. Ad esempio, per una stanza di  $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$  ( $75 \text{ m}^3$ ) con due persone sono sufficienti  $75/2 = 38 \text{ m}^3/h$  di aria fresca (cioè  $0,5 \text{ Vol/h}$ ) per garantire un ricambio fisiologico di  $19 \text{ m}^3/h$  per persona. Ovviamente le stanze di casa non sono permanentemente occupate e quindi la ventilazione naturale può, di norma, essere sufficiente. Per usi non residenziali le cose cambiano radicalmente. Occorre fornire una portata d'aria fresca di  $10 \text{ L/s}$ , corrispondente a  $36 \text{ m}^3/h$ , per persona negli uffici, ambienti di lavoro e attività terziarie. Questo significa che se in una stanza lavorano due persone occorre fornire  $72 \text{ m}^3/h$ , cioè occorre garantire un ricambio orario di aria di  $1 \text{ Vol/h}$ . Per una classe da  $10 \times 10 \times 3,5 = 350 \text{ m}^3$  che ospita 25 studenti di una scuola media occorre fornire  $10 \text{ L/s/persona} \times 25 \text{ persone} = 250 \text{ L/s}$  pari a  $900 \text{ m}^3/h$ , cioè  $900/350 = 2,57 \text{ Vol/h}$  ricambi d'aria per ora. Al crescere del numero di persone all'interno dell'ambiente deve crescere in proporzione il numero di ricambi orari;
- Ventilazione forzata (detta anche ventilazione meccanica), attraverso un impianto che richiama aria esterna nella quantità necessaria e la distribuisce negli ambienti mediante l'ausilio di un ventilatore e di una rete di condotte d'aria opportunamente dimensionata. La ventilazione meccanica è indipendente dalle condizioni climatiche esterne e garantisce sempre la portata d'aria necessaria per il ricambio fisiologico degli occupanti.

## La ventilazione nelle scuole italiane

Per le scuole, oggetto del nostro interesse, il D.M. del 1975 stabilisce, fra le tante cose, che i ricambi d'aria esterna necessari siano così predisposti:

1. per le scuole dell'infanzia e primarie:  $2,5 \text{ Vol/h}$ ;
2. per le scuole medie:  $3,5 \text{ Vol/h}$ ;
3. per le scuole superiori e le Università:  $5 \text{ Vol/h}$ .

La differenziazione per tipologia di scuola deriva dalle diverse necessità di aria esterna per ricambio fisiologici al variare dell'età degli alunni.

Il parco degli edifici scolastici italiani è obsoleto, costruito in gran parte dopo la guerra e prima che entrasse in vigore il succitato D.M. 1975. Anche gli edifici costruiti di recente, fino al 2000, hanno spesso, soprattutto nelle regioni meridionali, una grave assenza di impianti di ventilazione forzata ed effettuano il ricambio d'aria con l'apertura delle finestre. Manca, inoltre, un'anagrafe degli edifici scolastici e non è nota l'impiantistica presente in ciascuna scuola. In questa situazione, per i motivi che saranno esposti fra breve, parlare di ritornare in classe sapendo che la stragrande maggioranza delle scuole non può garantire un corretto ricambio d'aria appare decisamente allarmante.

La problematica della ventilazione nelle scuole italiane va risolta caso per caso riadattando o rifacendo ex novo gli impianti mancanti. Occorre, pertanto, un notevole investimento per garantire migliori condizioni di vivibilità e sicurezza nelle scuole. L'assenza di una corretta ventilazione con aria fresca esterna fa crescere la concentrazione

di CO<sub>2</sub> all'interno delle aule, con il rischio di superare i livelli massimi ammessi per la differenza fra concentrazione interna ed esterna,  $C - C_0$ , fissata in 800 ppm dalla recente norma UNI EN 16788-1/2019, producendo un incremento della disattenzione e perdita dell'apprendimento. Proprio nelle scuole questo non dovrebbe avvenire.

In base a queste osservazioni si presenteranno le simulazioni considerando tre casi di ricambi d'aria:

1. 0,5 Vol/h: per simulare una ventilazione naturale minimale per tutte le tipologie scolastiche;
2. 1,0 Vol/h: per simulare una ventilazione naturale incrementata ma non ancora sufficiente o un minimo di ventilazione meccanica, ove presente;
3. 2,5, 3,5 e 5 Vol/h, a seconda dei livelli scolastici, per simulare la situazione corrispondente all'applicazione del D.M. 1975 sulle scuole.

## Il metodo di calcolo adottato

Il metodo di calcolo adottato è quello di Rudnick-Milton modificato per tenere conto di condizioni variabili secondo i profili d'uso. Questo metodo, diversamente dagli altri due, si basa sul bilancio di CO<sub>2</sub> espirata dai soggetti presenti nell'ambiente che viene poi nuovamente inspirata durante la normale respirazione. La CO<sub>2</sub> diviene così un parametro di riferimento per quantificare la respirazione e re-respirazione totale all'interno degli ambienti. All'attività respiratoria è collegato il meccanismo di emissione dei droplet a sua volta collegato alla probabilità personale di contagio per via aerea.

Il metodo ha una forma analitica del tipo di Poisson:

$$P = 1 - e^{-\frac{\bar{f}qt}{N_p}} \quad (3)$$

ove il rapporto  $\bar{f}$  è la frazione volumetrica media di CO<sub>2</sub> ed  $N_p$  è il numero di persone presenti. Esso consente di effettuare un calcolo non stazionario della probabilità di contagio al variare con il tempo di calcolo di alcuni parametri quali:  $N_p$ ,  $l$ ,  $N_r$ . Si osservi che il numero di ricambi orari,  $N_r$ , non compare direttamente nell'espressione di  $P$  ma è indirettamente presente nella formulazione di  $\bar{f}$ .

È possibile avere un profilo d'uso delle aule, cioè è possibile stabilire la presenza o non delle persone (ad esempio, per doppi turni con pausa intermedia), per la presenza dell'infezione iniziale,  $l$ , che può considerarsi presente ad inizio di giornata per tutto il tempo di calcolo o ad inizio di ciascun turno di lezione. Inoltre, è anche possibile ipotizzare che durante l'intervallo per consentire il cambio di classe si possa attuare una sanificazione completa dell'aula oppure no. Si vedranno nel prosieguo diversi casi e combinazioni di profili d'uso per simulare diversi alcuni casi reali.

Il numero dei quanta di infezione dipende dal soggetto infetto iniziale e dall'attività svolta (lavoro sedentario, parlato a voce bassa o a voce alta): può essere un docente o un bambino o un adolescente o un ragazzo, a seconda della scuola considerata.

Si adotteranno, in tutte le simulazioni, tre livelli di produzione di quanta di infezione [6]:

- 30 quanta/h per bassa emissione tipica di un bambino;
- 50 quanta/h per emissione di medio livello tipica di un ragazzo o di un adulto;
- 90 quanta/h per alta emissione tipica di un adulto che parli ad alta voce.

Si calcolerà la distribuzione oraria dell'emissione dei quanta, che dipende dal numero dei ricambi orari  $N_r$ , in modo da valutare correttamente in condizioni variabili la probabilità di contagio,  $P$ . In questo modo il metodo di Rudnick-Milton si presta bene a simulare situazioni comunque variabili in funzione dell'utilizzo reale che ogni scuola intende attuare per le aule. I dettagli analitici del metodo di calcolo sono riportati in Appendice.

## Organizzazione delle simulazioni

Si simuleranno due casi:

- utilizzo con turno unico che può arrivare a 7 ore nel caso di scuola a tempo pieno;
- utilizzo con doppio turno separati da un intervallo per il cambio classe.

In quest'ultimo caso si esamineranno sia il caso di sanificazione delle aule durante l'intervallo che di assenza di sanificazione. In tutte le simulazioni si suppone una superficie per alunno da 4 m<sup>2</sup> a 6 m<sup>2</sup> a seconda del tipo di scuola, una superficie dell'aula confacente ad ospitare 16 persone distanziate di 1 m e un volume corrispondente.

Si assumono le seguenti dimensioni:

- Scuola primaria: aula da 8x8x3,3 = 211 m<sup>3</sup> con 4 m<sup>2</sup>/alunno, 16 presenze;
- Scuola media: aula da 9x9x3,3 = 267 m<sup>3</sup> con 5 m<sup>2</sup>/alunno, 16 presenze;
- Scuola superiore: aula da 10x10x3,3 = 330 m<sup>3</sup> con 6 m<sup>2</sup>/alunno, 16 presenze.

Si ipotizza che in aula gli alunni abbiano la mascherina di protezione di tipo chirurgico, efficienza di filtrazione frontale 0,9, (anche se pare sia possibile toglierla in aula) e non si considerano gli effetti di deposizione al suolo dei droplet e di riduzione della vitalità dei virus.

Non sono presi in considerazione, in questa sede, eventuali mezzi di riduzione (sanificazione) dei quanta/h quali l'utilizzo di filtri ad alta efficienza, di lampade U.V. a monte della distribuzione dell'aria (se è presente un impianto centralizzato). Si suppone, infine, che non si abbiano ricircoli di aria. In pratica, si desiderano simulare le condizioni reali delle aule tipiche delle scuole italiane.

## Come leggere le simulazioni

Le simulazioni riporteranno due abachi:

- nel primo si hanno i profili d'uso che indicano i profili orari delle grandezze ritenute variabili;
- nel secondo si hanno tre righe di abachi che forniscono, per ogni riga, le probabilità di contagio individuale, le probabilità di contagio globale e la distribuzione oraria dei quanta per le condizioni d'uso e, in particolare, per il numero di ricambi orari considerato in ciascun abaco.

Ogni abaco ha un titolo che riporta il metodo di calcolo (RMVT Rudnick Milton Variabile Transitorio), il volume dell'aula, il numero di persone, la presenza di filtri dell'aria, di lampade U.V., di mascherine, di deposito a terra dei droplet, di riduzione di vitalità del virus.

In ciascun abaco si hanno tre curve relative ad una produzione di 30, 50 e 90 quanta/h che rappresentano le tre tipologie di contatto che si desiderano considerare.

Fissato un tempo di permanenza nell'asse orizzontale delle ascisse (ore) si può leggere la corrispondente probabilità di rischio (individuale o globale a seconda dell'abaco considerato) sull'asse verticale (valore in percentuale).

## Considerazioni sui valori percentuali delle probabilità di contagio

Per rendersi conto del significato dei valori delle percentuali indicate dagli abachi, si riportano i seguenti dati per le probabilità di estrazione al Lotto di 1, 2 e 3 numeri (numero singolo, ambo su una ruota, terno su una ruota):

- probabilità di estrazione di un numero singolo su singola ruota:  $1/18 = 0,0556$  cioè 5,56%;
- probabilità di estrazione di un ambo su singola ruota:  $1/400,5 = 0,0025$  cioè 0,25%;
- probabilità di estrazione di un terno su singola ruota:  $1/11748 = 0,00008512$  cioè 0,0085%.

Ne consegue che valori di probabilità di rischio superiori a 0,5%

sono elevati (specie se sono superiore all'1%) mentre valori al di sotto di 0,5% sono accettabili (1 caso su 200).

Si osserverà, analizzando gli abachi delle probabilità, che questa è tanto minore quanto maggiore è il numero di ricambi orari, a parità di volume.

La probabilità di rischio globale dipende dal numero di soggetti sani (detti anche suscettibili di ammalarsi) pari al numero totali di presenti,  $N_p$ , meno l'infecto, cioè  $N_p-1$ .

**Considerazioni sulla sanificazione intermedia**

Se l'organizzazione scolastica prevede il doppio turno è possibile pensare di sanificare le aule in assenza degli alunni. Le operazioni da svolgere sarebbero semplici e rapide: ventilare i locali in modo da rinnovare l'aria ambiente, sanificare le superfici dei banchi, della cattedra o altre superfici ove possano essersi depositati i droplet. Queste operazioni, se correttamente svolte, cambiano il profilo d'uso facendo iniziare il calcolo del rischio di contagio partendo da zero ad ogni inizio di turno.

Se, tuttavia, il doppio turno non prevede il cambio di classe ma si configura come un orario prolungato, con pausa intermedia per la mensa, allora può sussistere la possibilità che ci sia un infecto che permanga nell'aula per tutto il tempo prolungato facendo venir meno l'ipotesi che i quanta si azzerino dopo la sanificazione e che il turno successivo abbia le stesse probabilità di contagio del primo turno.

Nell'ipotesi di orario prolungato l'ipotesi più cautelativa è di considerare il tempo di permanenza in aula pari a tutte le ore effettive. Il rischio di contagio sarà necessariamente più elevato rispetto ad un doppio turno reale.

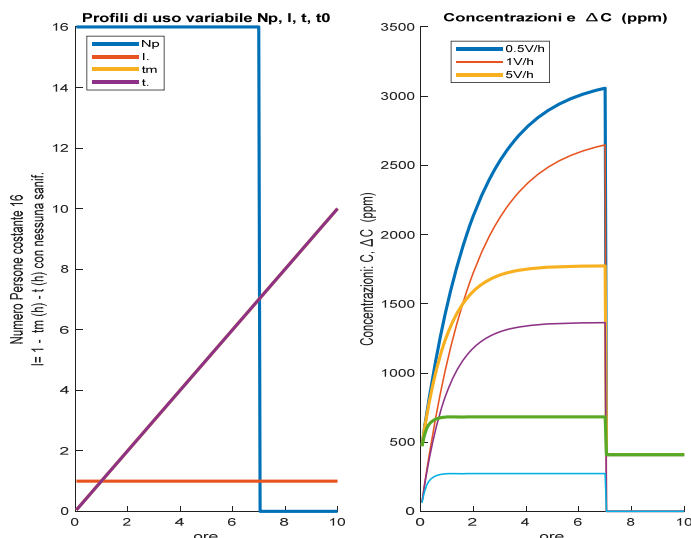
**SIMULAZIONI PER AULE DI SCUOLA PRIMARIA**

**Utilizzo con turno unico**

Si ipotizza l'utilizzo della sola mascherina di tipo chirurgico, con efficienza di filtrazione frontale 0,9, quale unico mezzo di protezione adottato. Il profilo d'uso è in Figura 1.

Nell'abaco di Figura 2 sono riportati nella prima fila le probabilità di rischio individuali,  $P$ , per i tre casi di ricambi orari 0,5, 1,0 e 2,5 Vol/h.

In ciascun abaco si hanno le curve di probabilità per i tre valori di 30, 60 e 90 quanta/h. Si osservi come per  $N_r = 0,5$  Vol/h si abbiano probabilità di contagio personali molto elevate e che queste si riducono sensibilmente al crescere di  $N_r$  fino ad 1/10 circa per  $N_r = 2,5$  Vol/h.



**Figura 1 – Profilo d'uso per aula primaria con turno unico**

Figure 1 – User profile for elementary School

Nella seconda fila si ha il numero di riproductività,  $R_0$ , detto anche probabilità di contagio globale dato dal prodotto  $(N_p - 1)P$ , ove  $N_p = 16$ .

Nella terza fila si ha l'andamento orario dei quanta di infezione per i tre casi ipotizzati. Si osserva come la distribuzione oraria vada a regime in tempi tanto più rapidi quanto più elevato è il numero di ricambi orari,  $N_r$ .

Infine, si sono traggurdati alcuni tempi di permanenza relativi a 4 ore e 9 ore con tempo pieno (supponendo di utilizzare l'ora breve di 40 minuti per limitare il rischio di contagio).

L'esame dell'abaco consente di fare alcune considerazioni importanti:

- se si desidera effettuare il tempo pieno, consumando i pasti sul posto subito dopo le prime ore di lezioni, si ha un rischio di contagio personale e globale più alto perché è aumentato il tempo di permanenza;
- a fortiori una prosecuzione delle lezioni dopo la pausa pranzo nella stessa aula incrementa le probabilità di contagio individuali e globali di circa il 60%;
- sarebbe opportuno consumare i pasti non rimanendo nella stessa aula ma spostandosi in un refettorio (se disponibile) di maggior volume e già sanificato. Nel frattempo, si potrebbero sanificare le aule utilizzate nelle ore mattutine in modo da ridurre le probabilità di contagio al rientro. Permane il rischio di un infecto presente anche dopo la ripresa dei lavori;
- è bene considerare la possibilità di ridurre ulteriormente l'ora breve a 30 minuti in modo da far rimanere gli alunni all'interno delle aule per un tempo di 3 ore. Si potrebbe compensare l'orario mancante con turni di didattica a distanza (DAD) nei pomeriggi o durante la settimana.

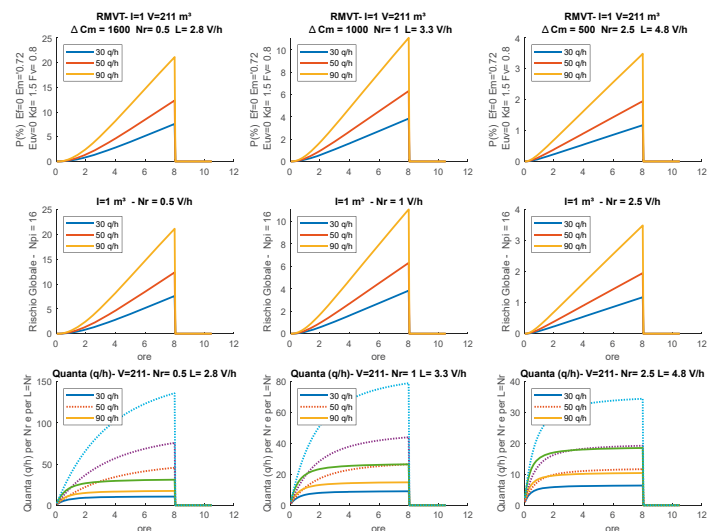
**Utilizzo con doppio turno**

Nell'ipotesi ora breve di 40 minuti e turni di 4 ore (6 ore ridotte) ed un intervallo per il cambio classi e sanificazione delle aule si hanno i profili d'uso di Figura 3.

Il calcolo delle probabilità di contagio individuale e globale è riportato nella Figura 4.

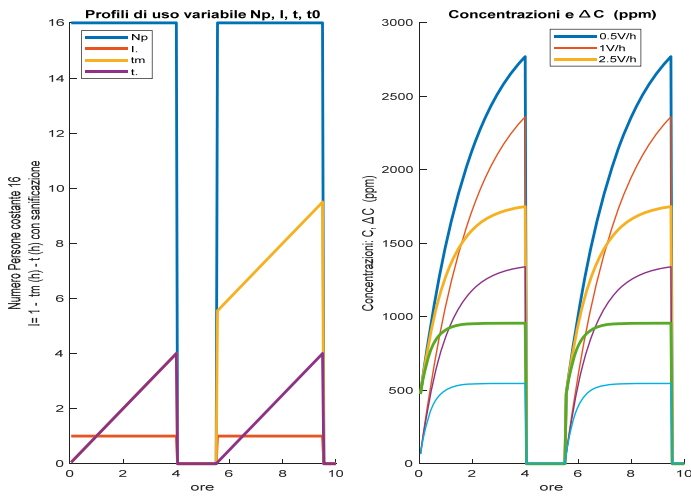
L'esame dei profili d'uso dei due casi esaminati induce le seguenti considerazioni:

- la sanificazione intermedia, durante l'intervallo, porta ad avere livelli



**Figura 2 – Calcolo delle probabilità individuale e globale per un'aula primaria a turno unico**

Figure 2 – Calculation of individual and global probabilities for a single-turn elementary classroom

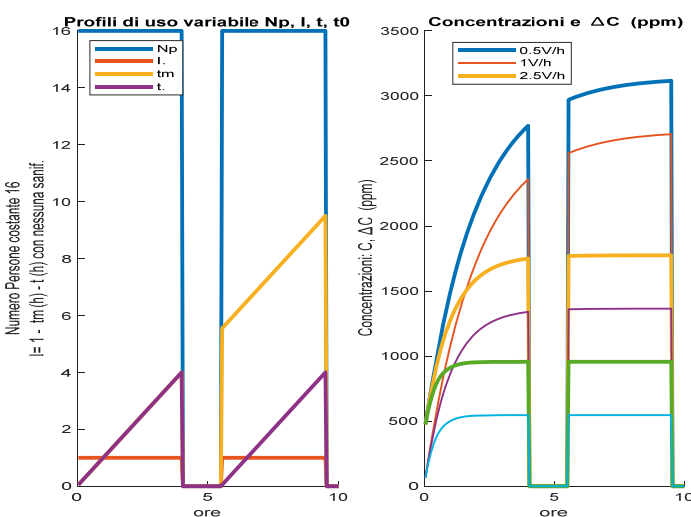


**Figura 3** – Profili d’uso per un’aula primaria con doppi turni di 4 ore e 1,5 ore di intervallo

Figure 3 – Usage profiles for a primary classroom with double shifts of 4 hours and 1.5 hour intervals

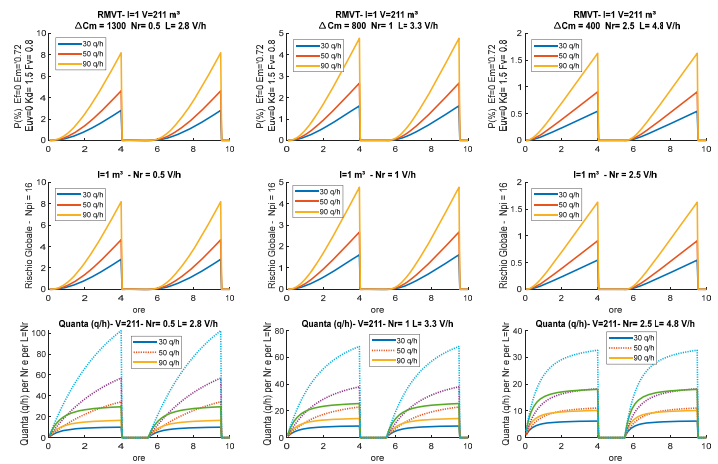
di CO<sub>2</sub> inferiori nei due turni a causa dello sviluppo incompleto dei transitori. (vedi curve nei profili d’uso);

- le probabilità di contagio individuali e globali alla fine di ciascun turno di 4 ore hanno valori inferiori al caso di turno unico precedente a causa dello sviluppo incompleto del transitorio per la variazione oraria dei quanta, sia per il primo turno che per il secondo turno. I valori delle probabilità di contagio possono essere lette già per i valori di fine turno di 4 ore;
- rimane invariata l’osservazione sulla differenza fra i valori delle probabilità di contagio individuali e globali al variare del numero dei ricambi orari e come sia importante, di conseguenza, avere una corretta e funzionale ventilazione meccanica;
- in assenza di quest’ultima (per  $N_r = 0,5$  e  $1,0$  Vol/h) è opportuno ridurre il più possibile il tempo di permanenza all’interno dell’aula perché i valori percentuali sono superiori all’1%;
- la permanenza nella stessa aula per consumare i pasti della mensa non è consigliabile per gli stessi motivi indicati in precedenza si hanno le stesse probabilità di contagio del turno unico. Meglio spostare gli alunni in un refettorio già sanificato e poi ritornare in aula sanificata per la prosecuzione delle lezioni.



**Figura 5** – Profili d’uso per un’aula primaria con doppio turno ma senza sanificazione intermedia

Figure 5 – Usage profiles for a primary classroom with double shift but without intermediate sanitation



**Figura 4** – Calcolo delle probabilità individuale e globale per un’aula primaria a doppio turno con sanificazione

Figure 4 – Calculation of individual and global probabilities for a double shift primary classroom with sanitation

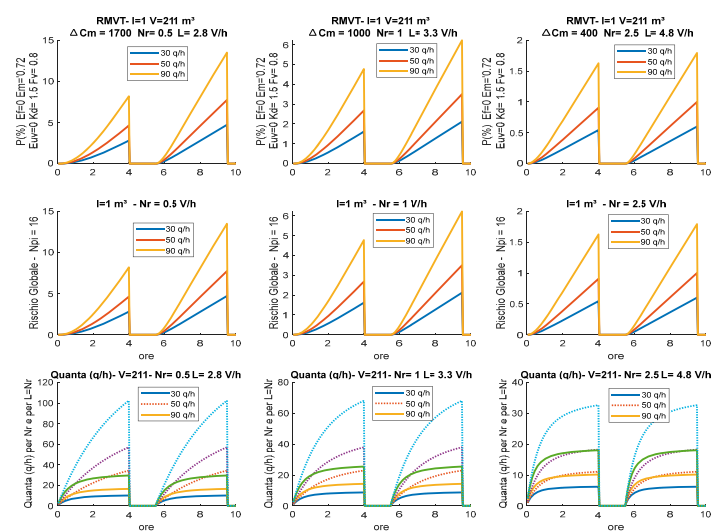
**Osservazioni sul calcolo della probabilità di contagio per le aule della scuola primaria**

Alla luce delle simulazioni effettuate per la scuola primaria si consiglia di far permanere gli alunni nelle aule il minor tempo possibile se la ventilazione di aria esterna non è conforme al valore di regolamento:  $N_r = 2,5$  Vol/h. Purtroppo, nelle scuole primarie italiane la ventilazione meccanica manca quasi sempre e pertanto è sconsigliabile la permanenza in aula in modo continuativo per il tempo pieno.

Le cose migliorano con il doppio turno, pur rimanendo critica per i bassi valori dei ricambi orari, a condizione che si riesca a sanificare le aule durante l’intervallo. Quest’operazione richiede tempo e personale sufficiente e si richiede un’organizzazione adeguata delle singole scuole per poterla attuare.

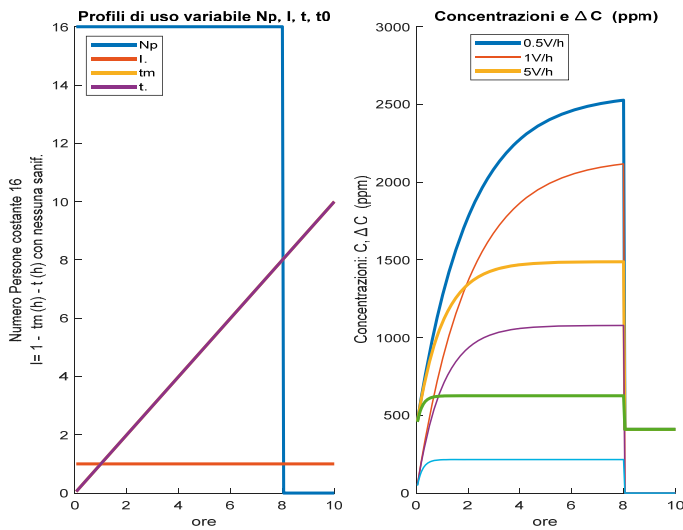
Senza sanificazione intermedia le probabilità di rischio aumentano in analogia a quanto visto per il turno unico, come si può osservare dal profilo d’uso di doppio turno senza sanificazione intermedia delle aule, in Figura 5.

In queste condizioni le curve di probabilità del contagio non si azzerano nell’intervallo per effetto della sanificazione ma riprendono la loro evoluzione in crescita, come nel caso di turno unico, in Figura 6.



**Figura 6** – Calcolo delle probabilità individuale e globale per aula primaria da 330 m<sup>3</sup> con doppio turno e sanificazione

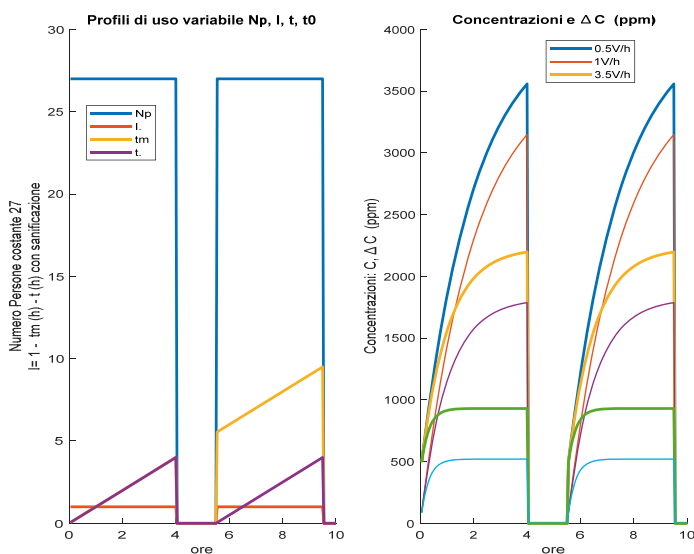
Figure 6 – Calculation of individual and global probabilities for 330 m<sup>3</sup> primary classroom with double shift and sanitation



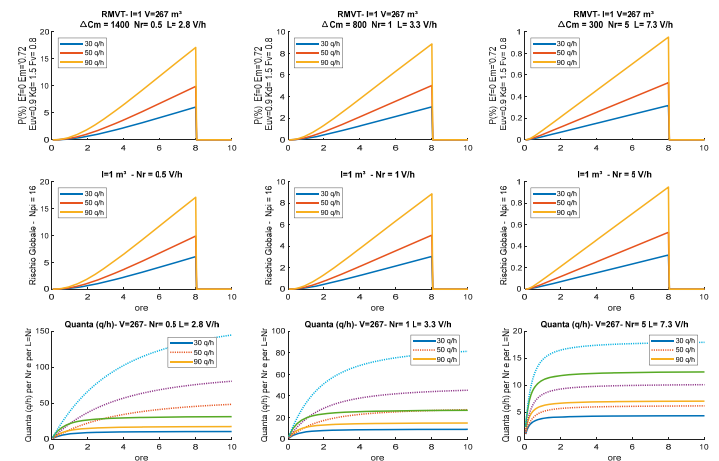
**Figure 7 – Profilo d’uso di un’aula di scuola media con turno unico**  
 Figure 7 – Usage profile of a middle school classroom with one shift

Si è considerata un’aula di dimensioni tipiche per la scuola primaria, 64 m<sup>2</sup> di superficie e 3,3 m di altezza con un numero di 16 persone al massimo (1 docente e 15 alunni) per rispettare il distanziamento interpersonale. Con aule di maggior volume, ad esempio 10x10x3,3 = 330 m<sup>3</sup> ed un’occupazione di 17 persone si avrebbe una situazione leggermente migliore. La probabilità di contagio individuale e globale sarebbero inferiori ma pur sempre elevati per numero di ricambi orari 0,5 e 1,0 Vol/h.

In tutte le simulazioni effettuate si ha un aumento della probabilità di contagio al crescere del numero dei quanta. Per 30 e 50 quanta/h si hanno rischi inferiori e rappresentano i casi relativi a basse emissioni di cariche virali. Per 90 quanta/h si hanno rischi elevati in qualunque condizione e numero di ricambi orari. Questo deve consigliare di mantenere bassa l’attività dei presenti (gli alunni seduti e calmi) e il docente dovrebbe parlare al più basso livello di emissione sonora. Passare dal parlato normale al parlato urlato significa aumentare moltissimo l’emissione di cariche virali nel caso sia il docente ad essere infetto.



**Figure 9 – Profilo d’uso per un’aula di scuola media con doppio turno e sanificazione intermedia**  
 Figure 9 – Usage profile for a middle school classroom with double shift and intermediate sanitation



**Figure 8 – Calcolo delle probabilità individuale e globale per un’aula di scuola media con turno unico**  
 Figure 8 – Calculation of individual and global probabilities for middle school classroom with single shift

**SIMULAZIONI PER AULE DI SCUOLA MEDIA**

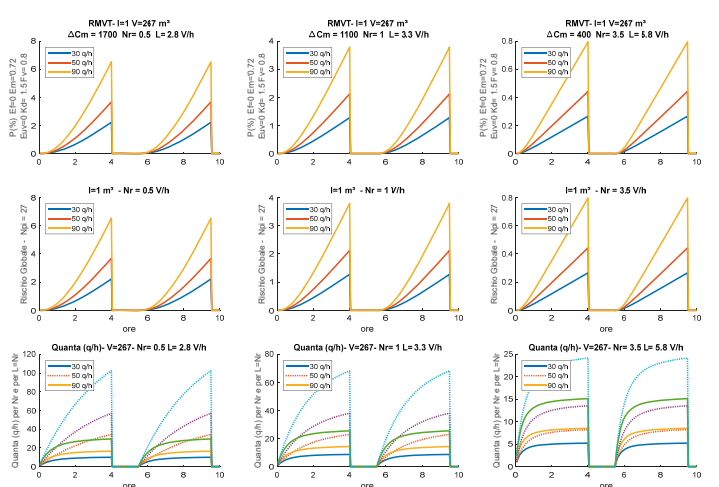
Ipotizziamo che l’aula abbia dimensioni 9x9x3,3 = 267 m<sup>3</sup>, che si abbiano ancora Np = 16 e si effettuino le simulazioni per numeri di ricambi orari pari a 0,5, 1,0 e 3,5 Vol/h. Si ricorda che il D.M. 1975 per le scuole prevede un numero di ricambi orari di 3,5 Vol/h.

**Utilizzo del turno unico**

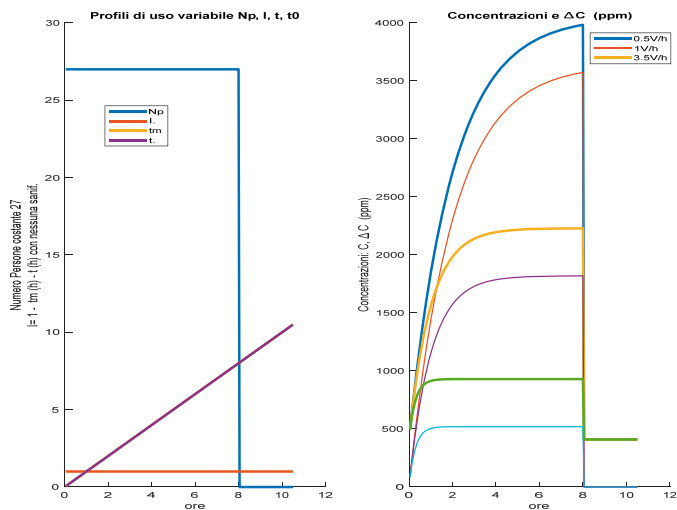
Si ipotizza un unico turno di 7 ore (tempo pieno con mensa) senza alcun intervallo. Il profilo d’uso è rappresentato in Figura 7.

Il calcolo delle probabilità di contagio individuali e globali è in Figura 8.

Anche in questo caso si hanno valori elevati di rischio di contagio per Nr = 0,5 e 1,0 Vol/h. Si hanno valori sensibilmente inferiori per Nr = 3,5 Vol/h, tranne per 90 quanta/h. Si sono guardati i valori per t = 4 ore e 7 ore per una lettura più agevole. Anche in questo caso senza un’adeguata ventilazione meccanica si hanno rischi di contagio elevati. È consigliabile ridurre il tempo di permanenza in aula ed evitare di consumare i pasti sugli stessi banchi.



**Figure 10 – Calcolo delle probabilità individuale e globale per un’aula di scuola media con doppio turno e sanificazione**  
 Figure 10 – Calculation of individual and global probabilities for middle school classroom with double shift and sanitation



**Figura 11** – Profilo d’uso di un’aula di scuola superiore con turno unico

Figure 11 – Profile of the use of a high school classroom with single shift

**Utilizzo del doppio turno**

Ipotizzando due turni di 4 ore (ore ridotte a 40 minuti) con 1,5 ore di intervallo con sanificazione delle aule si ha il profilo d’uso di Figura 9.

Le probabilità di contagio sono riportate nell’abaco di Figura 10.

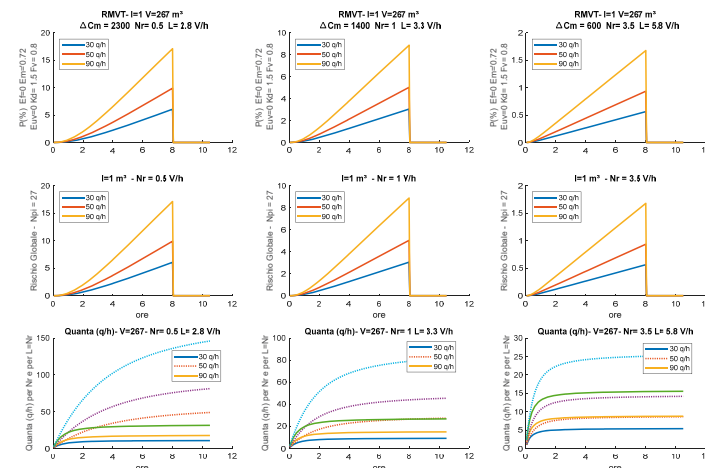
Valgono le stesse considerazioni già presentate per l’aula della scuola primaria. Il doppio turno con sanificazione dei locali riduce molto i rischi di contagio, anche se valori accettabili si hanno solo con la ventilazione di legge di 3,5 Vol/h. Permane l’alto valore del rischio di contagio con 90 quanti/h.

**SIMULAZIONI PER AULE DI SCUOLA SUPERIORE**

Si utilizza un’aula da 10x10x3,3 = 330 m<sup>3</sup> con 17 persone all’interno. Il numero di ricambi orari previsto dal D.M. 1975 è ora pari a 5 Vol/h.

**Utilizzo del turno unico**

I profili d’uso sono in Figura 11.



**Figura 12** – Probabilità individuale e globale per un’aula di scuola superiore con turno unico senza sanificazione

Figure 12 – Individual and global probability for high school classroom with single shift without sanitation

Gli abachi delle probabilità di contagio sono in Figura 12.

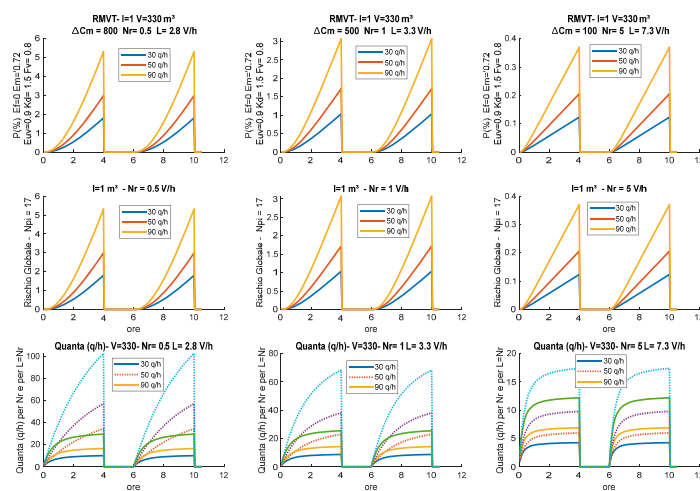
Valgono le stesse considerazioni già presentate per l’aula della scuola primaria. Il turno unico senza sanificazione dei locali aumenta molto i rischi di contagio, anche se valori accettabili si hanno solo con la ventilazione di legge di 5,0 Vol/h. Permane l’alto valore del rischio di contagio con 90 quanti/h.

**Utilizzo del doppio turno**

I profili d’uso sono riportati in Figura 13.

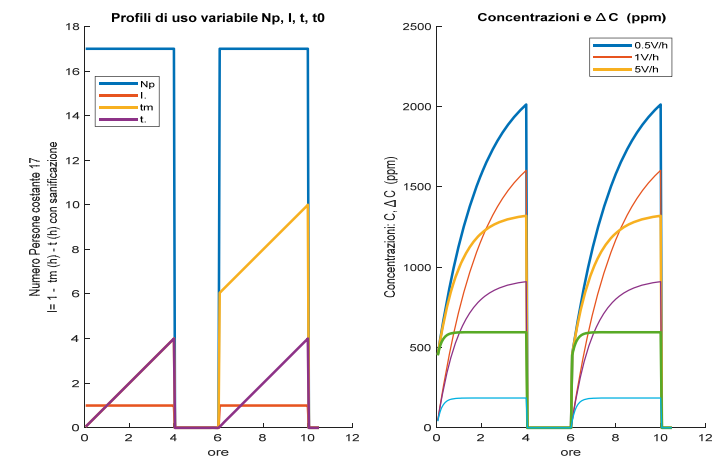
Gli abachi delle probabilità di contagio sono riportati in Figura 14.

Valgono le stesse considerazioni già presentate per l’aula della scuola primaria e media. Il doppio turno con sanificazione dei locali riduce molto i rischi di contagio, anche se valori accettabili si hanno solo con la ventilazione di legge di 5,0 Vol/h. Permane l’alto valore del rischio di contagio con 90 quanti/h.



**Figura 14** – Probabilità individuale e globale per un’aula di scuola superiore da 330 m<sup>3</sup>, doppio turno e sanificazione

Figure 14 – Individual and global probability for 330 m<sup>3</sup> high school classroom, double shift and sanitation



**Figura 13** – Profilo d’uso di un’aula di scuola superiore con doppio turno e sanificazione

Figure 13 – Profile of the use of a high school classroom with double shift and sanitation



## Osservazioni finali

L'utilizzo di aule non sufficientemente dotate di impianti di ventilazione forzata a norma di legge e l'utilizzo quasi esclusivo della ventilazione naturale porta ad avere condizioni di rischio da contagio individuale e globale elevati e tali da non consigliare, per turni unici, la permanenza degli studenti all'interno dei locali oltre le 3 ore consecutive. È necessario considerare ore brevi di 40 o meglio 30 minuti e programmare l'integrazione degli orari con lezioni a distanza (*DAD*) nei pomeriggi.

La situazione migliora nel caso di doppi turni di 3-4 ore ciascuno e un intervallo di almeno 1,5 ore per consentire sia il cambio di classe che la sanificazione delle aule.

Nel caso di tempo pieno con consumo di pasti a scuola è altamente consigliabile utilizzare un refettorio esterno già sanificato, di adeguata capacità e rispondente alle norme di distanziamento individuale di 1 m, e poi riprendere le lezioni in aule sanificate durante la pausa pasto. Consumare i pasti nella stessa aula significa prolungare i tempi di permanenza oltre le 3-4 ore con un incremento del rischio di contagio se si fosse in turno unico.

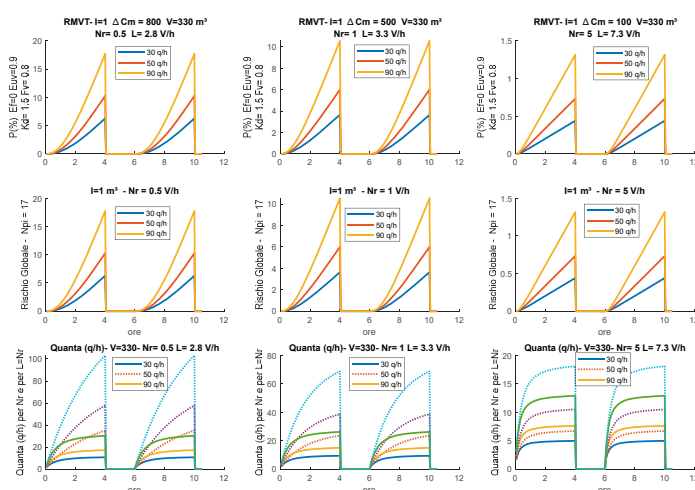
Malgrado l'utilizzo della mascherina sia obbligatorio solo per gli spostamenti (entrata e uscita) di massa e tollerato il non utilizzo in aula (purché siano rispettate le distanze di 1 m fra i banchi) si ritiene che questo dispositivo di protezione individuale (*DIP*) sia assolutamente necessario per ridurre il rischio di contagio.

A conferma di quanto detto si riporta l'ultima simulazione per scuola superiore con doppio turno e sanificazione intermedia senza l'utilizzo della mascherina con efficienza frontale 0,9.

In Figura 15 si ha la simulazione con doppio turno, sanificazione e assenza di mascherina.

Come si può facilmente osservare i valori delle probabilità sono cresciuti sensibilmente, circa tre volte, e non sono più valide le considerazioni precedentemente fatte.

Quanto sopra illustrato giustifica ancora le disposizioni relative alla protezione da breve distanza rendendole ancora più necessarie



**Figura 15** – Probabilità di contagio per un'aula di scuola superiore con doppio turno, sanificazione senza mascherina

Figure 15 – Probability of contagion for high school classroom with double shift, sanitation without mask

nei locali chiusi, indipendentemente dalla ventilazione presente.

Per scuole attrezzate con impianti di ventilazione a norma di legge è possibile cercare di migliorare la protezione dal contagio virale utilizzando tecniche oggi predisposte a questo scopo. Ad esempio, è possibile utilizzare per l'aria di ricambio (ed anche per l'aria di ricircolo se ben realizzato) i filtri ad alta efficienza HEPA ( $\eta_{\text{filtro}} > 0,9$ ), oppure associare lampade inertizzanti antibatteriche e antivirali del tipo UV-C con efficienza superiore a 0,9.

Si ripete la stessa simulazione per l'aula della scuola superiore, vedi Figura 16, con l'aggiunta, oltre che della mascherina, anche dei filtri, delle lampade UV-C, del fattore di deposito dei droplet e di riduzione della vitalità dei virus.

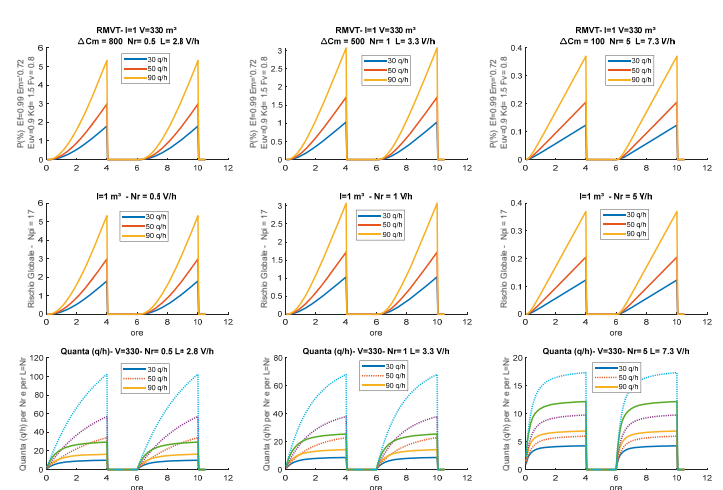
Il confronto con l'abaco precedente, o anche quello con l'uso delle sole mascherine, mostra una riduzione notevole dei valori di probabilità di contagio individuale e globale dovuto ai meccanismi sopra indicati e tali da rendere possibili l'utilizzo dell'aula in qualunque condizione ( $P < 0,5\%$ ) e per qualunque valore dei quanta.

Nell'ultima fila della figura si ha la distribuzione oraria dei quanta per i tre casi di ventilazione. In essa si hanno, per ciascun abaco, due serie di curve:

- quelle a tratto intero che non prevedono alcun mezzo di riduzione;
- quelle tratteggiate, a pari valore dei quanta nominali, che prevedono la correzione del numero di ricircolo  $N_r$  con gli apporti dei benefici sopra indicati. In pratica al valore di  $N_r$  viene sommato ciascun contributo strumentale equivalente ad un incremento fittizio del numero di ricambi orari iniziale. Detto  $L$  questo nuovo valore è possibile vedere la differenza fra  $L$  e  $N_r$ .

Questi benefici possono essere ottenuti anche su impianti esistenti, purché presenti, mediante refurbishment con componenti più nuovi ed efficienti dotati di filtri e lampade UV e modificando il layout dell'impianto per beneficiare di questi apporti positivi.

Occorre pianificare un grande piano di interventi sugli impianti delle scuole italiane per renderle più sicure rispetto a quanto oggi possano essere nelle condizioni critiche nelle quali si trovano.



**Figura 16** – Probabilità di contagio per un'aula di scuola superiore da 330 m<sup>2</sup>, doppio turno, sanificazione, mascherina, filtri e UV

Figure 16 – Probability of contagion per 330 m<sup>2</sup> high school classroom, double shift, sanitation, mask, filters and UV

## APPENDICE – METODO DI CALCOLO DI RUDNICK E MILLER MODIFICATO PER IL CALCOLO DINAMICO

Questo metodo è apparso nella rivista Indoor Air nel 2003 ad opera di S.N. Rudnick e D.K. Milton, della Harvard School of Public Health, Department of Medicine, due medici che hanno voluto approfondire e modificare l'impianto calcolistico di Wells-Riley e di Gammaitoni-Nucci impostato sul bilancio dei quanta e degli infetti negli ambienti.

L'idea di base è che il virus in circolazione venga veicolato attraverso l'aria di espirazione dell'infetto, successivamente re-inspirata dai soggetti suscettibili presenti. Tanto più elevata è questa attività tanto maggiore sarà la possibilità di trasmettere il contagio.

Poiché l'aria espirata dalle persone presenti all'interno dell'ambiente contiene una percentuale di CO<sub>2</sub>, oltre che una minore percentuale di O<sub>2</sub> rispetto all'aria inspirata, è possibile utilizzare la concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'aria quale tracciante dell'attività di respirazione dei soggetti all'interno dell'ambiente.

La novità del metodo consiste, infatti, nel tenere conto delle persone effettivamente presenti all'interno dell'ambiente e della quantità di aria respirata e re-respirata in passaggi successivi.

Il corpo umano respira assumendo una portata d'aria esterna che dipende da numerosi fattori: età, attività, stato di salute generale, stato di salute polmonare, ecc.

In tutti i casi nell'espirazione parte dell'ossigeno presente nell'aria inspirata viene a mancare (attività di ossigenazione sanguigna) perché sostituito dalla CO<sub>2</sub>. Questo gas è facilmente tracciabile con opportuni sensori, facilmente reperibili sul mercato anche per le applicazioni sulla Qualità dell'aria, e quindi è possibile risalire all'attività respiratoria globale dei presenti tracciando la CO<sub>2</sub> emessa. Naturalmente si fa l'ipotesi che non vi siano altre sorgenti di CO<sub>2</sub> oltre quella di origine espiratoria.

È possibile scrivere un bilancio, nell'ipotesi di ventilazione ben miscelata:

$$C_a V_e = (C - C_0) V \quad (4)$$

ove si ha:

$C_a$  = frazione volumetrica di CO<sub>2</sub> aggiunta all'aria espirata durante la respirazione;

$V$  = volume dell'ambiente, m<sup>3</sup>;

$V_e$  = volume equivalente dell'aria espirata contenuta nell'ambiente, m<sup>3</sup>;

$C$  = frazione volumetrica di CO<sub>2</sub> nell'aria interna (che dipende dalla portata di ventilazione);

$C_0$  = frazione volumetrica di CO<sub>2</sub> nell'aria esterna.

Risolviendo la precedente equazione per il rapporto  $V_e/V$  si ottiene:

$$f = \frac{V_e}{V} = \frac{C - C_0}{C_a} \quad (5)$$

ove  $f$  è la frazione equivalente di aria interna che viene espirata e che è anche la frazione di aria nuovamente respirata. Si osservi la definizione di  $f$  è valida sia per regime transitorio che stazionario.

Per il periodo totale di esposizione,  $t$ , è possibile calcolare la frazione di aria espirata,  $\bar{f}$ , integrando  $f$  nel periodo di tempo considerato.

La frazione equivalente di aria interna,  $f$ , può essere determinata anche dalla relazione:

$$f = \frac{V_e}{V} = \frac{N_p \cdot p}{N_r \cdot V} \quad (6)$$

essendo il volume di aria espirata, detta  $p$  la portata di respirazione, data dalla relazione:

$$V_e = N_p p \quad (7)$$

Per il calcolo della differenza  $C - C_0$  si è tenuto conto, a regime stazionario, della relazione:

$$C - C_0 = \frac{C_G}{N_r \cdot V} = \frac{p' \cdot N_p}{N_r \cdot V}$$

con il simbolismo:

$p'$  = portata di CO<sub>2</sub> emessa per ventilazione, m<sup>3</sup>/h;

$N_r = 46$  di attività normale.

Supponiamo, ancora, che siano costanti:

- la produzione dei quanta/h, che indichiamo con  $q$ ;
- la portata totale di respirazione,  $p$ ;
- il numero di soggetti infetti,  $l$ ;
- il numero di persone all'interno del volume ventilato,  $N_p$ .

In queste condizioni la concentrazione spaziale dei quanta di infezione,  $N$ , è pari alla concentrazione dei quanta nell'aria espirata dai soggetti infetti,  $q/p$ , moltiplicata per la frazione volumetrica di aria espirata dagli infetti nel volume dell'ambiente,  $fl/N_p$ , e pertanto si ha:

$$N = \frac{flq}{N_p p}$$

Il valore medio nel tempo  $t$  risulta:

$$\bar{N} = \frac{\bar{f}lq}{N_p p}$$

Ricordando la relazione di Poisson:

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

sostituendo i valori calcolati si ottiene la probabilità di contagio,  $P = I/S$ :

$$P = \frac{I}{S} = 1 - e^{-\frac{\bar{f}lqt}{N_p p}} \quad (9)$$

Quest'equazione resta valida sia in condizioni stazionarie che transitorie e può non dipendere dalla conoscenza diretta della portata d'aria di ventilazione, solitamente difficoltosa da calcolare in impianti esistenti.

Basta misurare la CO<sub>2</sub> prodotta all'interno e quella dell'aria di ventilazione (esterna) per ottenere  $f$  e, integrando nel tempo,  $\bar{f}$ , e quindi la probabilità di contagio  $P$ .

### Diverse possibilità di utilizzo del metodo di Rudnick e Milton

Le diverse formulazioni della frazione equivalente di aria interna,  $f$ , date dalle espressioni (5) e (8) consente di utilizzare il metodo di calcolo in due modi differenti.

#### Modo diretto di Progetto

Sono noti:

$N_r$  = numero di ricambi orari, Vol/h;

$N_p$  = numero di persone presenti nell'ambiente;

$p$  = portata di respirazione, m<sup>3</sup>/h;

$V$  = volume dell'ambiente, m<sup>3</sup>.

Si calcola

$$f = \frac{N_p \cdot p}{N_r \cdot V}$$

Si utilizza la relazione (9) per il calcolo della probabilità di contagio individuale.

L'aver imposto a denominatore la portata d'aria totale  $Q = N_r V$  e il numero di persone  $N_p$  significa imporre la differenza  $\Delta C = C - C_0$  in base alla relazione, a regime stazionario:

$$C - C_0 = \frac{G_i}{N_r \cdot V}$$

con  $\Delta C$  espressa in ppm e  $G_i$ , sorgente interna, in L/h. Pertanto, questo valore non è noto a priori e può anche corrispondere a condizioni di qualità dell'aria non conformi alle norme.

#### Modo indiretto di verifica

In questo caso si impone direttamente  $\Delta C$  perché noto da misure dirette della CO<sub>2</sub> con sensori di questo gas. Si calcola la frazione equivalente di aria interna,  $f$ , con la relazione (8), cioè:

$$f = \frac{C - C_0}{C_a}$$

con  $C_a = 36.700$  ppm in condizioni di attività moderata (ufficio, scuola, ecc.).

Si calcola, quindi, la probabilità di rischio individuale mediante la relazione (9).

Si osservi che avendo fissato  $\Delta C$  dalla relazione deriva il numero di ricambi orari,  $N_r$ , non fissato come dato di progetto.

Potrebbe anche verificarsi che la  $N_r$  corrispondente sia inferiore o superiore a quella realmente presente in ambiente.

### Calcolo dinamico discretizzato

La relazione (9) è valida sia in condizioni stazionarie, vedi i due modi di utilizzo precedenti, che non stazionarie, in particolare in condizioni che definiamo dinamiche discretizzate, cioè con parametri di calcolo e condizioni operative variabili discretamente nel tempo totale di calcolo.

Per potere operare in questo modo occorre apportare alcune modifiche alla forma matematica della relazione di Rudnick e Milton, cioè occorre scriverla in modo discreta e vettorializzata.

Le grandezze che compaiono nella relazione (9) possono, in tutto o in parte, essere vettorializzate, cioè trasformate in sequenze numeriche a passo costante secondo un profilo d'uso che indichi una desiderata variabilità temporale, anche non uniforme, dei parametri e delle variabili di calcolo.

In queste ipotesi l'espressione (9) diviene:

$$P = 1 - e^{-\frac{\bar{f} \cdot I \cdot q \cdot t_{uso}}{N_p}} \quad (10)$$

ove in grassetto si sono indicate le grandezze vettoriali in forma discreta.

Anche il tempo, indicato con il simbolo  $t_{uso}$ , è discretizzato in modo conforme al profilo d'uso, cioè in modo da garantire la sequenza temporale desiderata, ad esempio nei doppi turni di lavoro o nel tenere conto di una sanificazione dei locali durante la pausa di lavoro in modo da azzerare gli accumuli di CO<sub>2</sub> (ricambio totale dell'aria ambiente) e di quanta di infezione del turno precedente, come si può osservare nella Figura 17.

In essa si hanno le seguenti grandezze discrete vettorializzate:  $N_p$  = numero di persone presenti al variare del tempo. Nel caso in esame le 17 persone sono presenti in due turni di 4 ore ciascuno con una pausa di 1,5 ore;

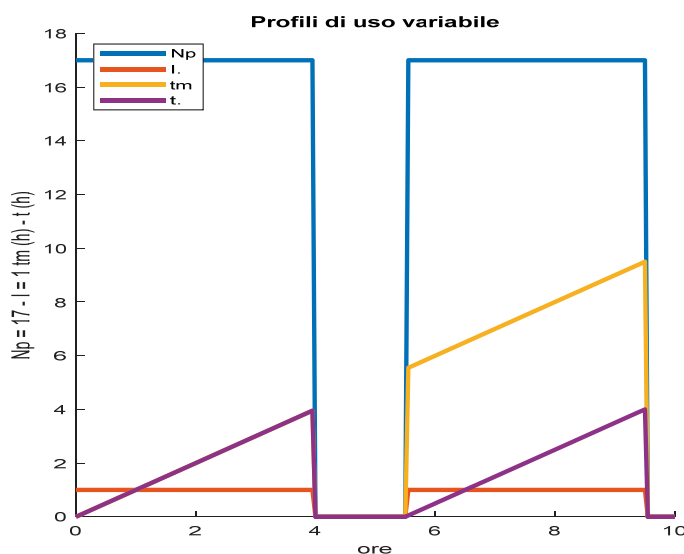


Figura 17 – Esempio di profilo d'uso

Figure 17 – Example of use profile;

$I$  = numeri di persone infette iniziali presenti durante il calcolo, anch'esso in forma discreta e vettorializzata. Nel caso in esame è presente 1 infetto ad ogni inizio di turno di lavoro, avendo supposto la sanificazione del locale durante la pausa;

$t_m$  = tempo progressivo di calcolo, in forma discreta e vettorializzata.

Nel caso in esame si annulla durante la pausa intermedia perché non sono presenti persone né infetti;

$t$  = tempo di calcolo secondo il profilo d'uso per ciascun turno di lavoro. Esso comincia sempre da 0 ad inizio di ciascun turno, nel caso di attuazione della sanificazione del locale, altrimenti avrebbe lo stesso andamento di  $t_m$ . Il tempo di calcolo,  $t$ , realizza il calcolo discretizzato in conformità alle scelte fatte nel profilo d'uso. Esso si applica a tutte le grandezze calcolate con la relazione E): probabilità di contagio individuale, probabilità di contagio globale e distribuzione oraria dei quanta.

I prodotti vettoriali sono scalari (elemento per elemento) nella sequenza in cui sono indicati nella relazione (10) di calcolo della probabilità di contagio.

Anche il calcolo di  $\bar{F}$  deve essere discretizzato e vettorializzato nella forma:

$$c - c_0 = \frac{c_G}{V} = \frac{p' \cdot N_p}{N_r \cdot V} \quad (11)$$

ove i vettori discretizzati sono segnati in grassetto.

Per la vettorializzazione della variazione oraria della concentrazione di CO<sub>2</sub> (in ppm) si scrive il bilancio per la concentrazione di CO<sub>2</sub>:

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

con:

$V$  = volume dell'ambiente. (m<sup>3</sup>);

$c$  = concentrazione, (ppm);

$Q$  = portata di ventilazione (m<sup>3</sup>/h) che è pari a  $N_r \cdot V$ ;

$c_0$  = concentrazione dell'aria di mandata, (ppm);

$dc$  = variazione di concentrazione, (ppm);

$dt$  = intervallo di tempo, (h);

$\dot{V}_{pol}$  = tasso di generazione di inquinanti nella stanza, (L/h).

La soluzione in regime transitorio è:

$$c = c_0 + c_G + (c_I - c_0 - c_G) e^{-N_r \cdot t_{uso}} \quad (12)$$

ove si ha:

$c$  = concentrazione di CO<sub>2</sub> all'interno dell'ambiente, (ppm);

$c_0$  = concentrazione dell'aria esterna di mandata, (ppm);

$c_G$  = sorgente interna di CO<sub>2</sub>, (ppm);

$c_I$  = concentrazione iniziale nell'ambiente, (ppm);

$N_r$  = numero di ricambi orari d'aria esterna, (Vol/h);

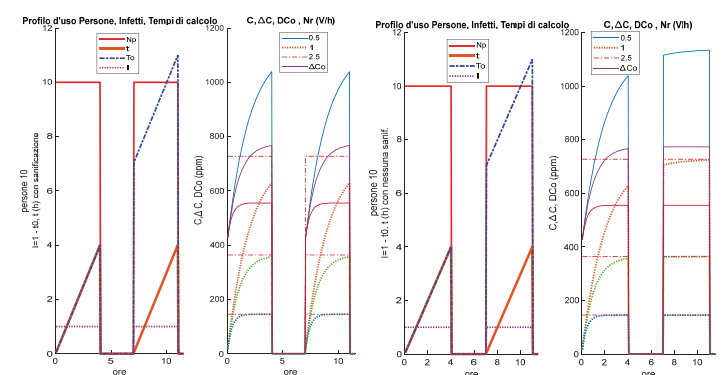
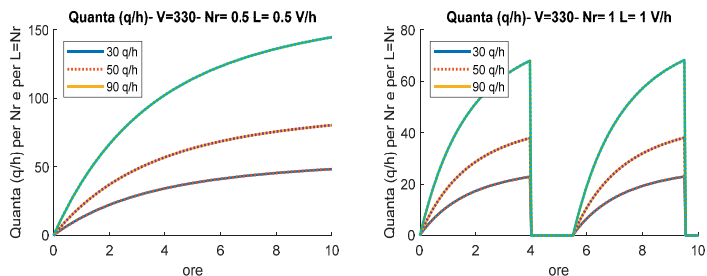


Figura 18 – Andamento delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> per doppio turno con e senza sanificazione intermedia

Figure 18 – Trend of CO<sub>2</sub> concentrations for double shift with and without intermediate sanitation



**Figura 19 – Distribuzione oraria della produzione dei quanta senza sanificazione intermedia e con sanificazione**

Figure 19 – Hourly distribution of the quanta production without intermediate sanitization and with sanitization

$t_{uso}$  = tempo di calcolo, (h).

Si osservi come  $t_{uso}$  determini l'andamento delle concentrazioni con o senza sanificazione in caso di doppio turno, come illustrato nella Figura 18.

A sinistra si ha la sanificazione e quindi all'inizio del secondo turno si azzerano le concentrazioni di CO<sub>2</sub> e dei quanta di infezione. A destra si ha una pausa senza sanificazione e pertanto la variazione della concentrazione di CO<sub>2</sub> e della distribuzione oraria dei quanta non si interrompe.

Dalla distribuzione di  $c$  si ricava  $\Delta c = c - c_0$  e quindi i valori discretizzati di  $f$ :

$$f = \frac{c - c_0}{C_a} \quad (13)$$

Data la distribuzione oraria di  $f$  se ne calcola il valore medio:

$$\bar{f} = \frac{\sum_0^t f}{\Delta t} \quad (14)$$

utilizzato per il calcolo delle probabilità di contagio.

La variazione temporale della produzione dei quanta è calcolata mediante la relazione vettoriale discretizzata:

$$q_{media}(t) = \frac{q \cdot f_{masc}}{L} \left[ 1 - \frac{1}{L \cdot \Delta T} (1 - e^{-L \cdot \Delta t}) \right] \quad (q/h) \quad (15)$$

ove si è indicato, secondo il metodo di Fisk e Nazaroff, con  $L$  l'espressione:

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

Il termine  $L$  tiene conto degli effetti di riduzione dei quanta mediante i seguenti termini:

- $\lambda_{ventilazione}$  = numero di ricambi orari per ventilazione,  $N_r$ ;
- $\lambda_{filtrazione}$  = numero equivalente di ricambi orari aggiuntivi per effetto della filtrazione;
- $\lambda_{UV}$  = numero equivalente di ricambi orari aggiuntivi per effetto dei raggi UV;
- $\lambda_{deposito}$  = numero equivalente di ricambi orari aggiuntivi per il deposito dei droplet;
- $\lambda_{vitalità}$  = numero equivalente di ricambi orari aggiuntivi per riduzione della vitalità virale;
- $f_{masc}$  = fattore di riduzione del flusso dei quanta per effetto dalla mascherina.

Risultano [5]:

$$\lambda_{filtrazione} = f_{HVAC} \frac{Q_{filtro} \eta_{filtro}}{V} = \lambda_{filtrazione} \eta_{filtro} \quad (16)$$

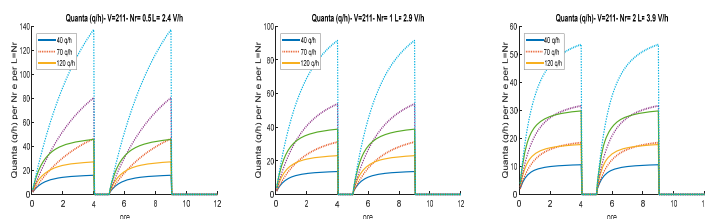
$$f_{masc} = \left[ 100 - \left( X - \frac{X \cdot Y}{100} \right) \right] \% \quad (17)$$

con  $X$  e  $Y$  efficienze frontale e laterale della mascherina e  $f_{HVAC}$  la percentuale del tempo di funzionamento dell'impianto HVAC.

Il termine  $\lambda_{deposito}$  varia da 0,8 a 1,5 Vol/h e  $\lambda_{vitalità}$  varia da 0,5 a 1,2 Vol/h.

Anche la distribuzione oraria dei quanta segue le stesse evoluzioni della distribuzione della concentrazione di CO<sub>2</sub>, come illustrato nella seguente Figura 19.

A sinistra la distribuzione oraria dei quanta non risente della sanificazione



**Figura 20 – Effetto dei mezzi di sanificazione sulla produzione oraria dei quanta di infezione**

Figure 20 – Effect of sanitation on the hourly production of the quanta of infection

e non ha interruzioni, a destra è presente la sanificazione intermedia e la distribuzione oraria dei quanta riparte da zero al secondo turno.

### Influenza del numero di ricambi orari corretto

Per il calcolo delle variazioni orarie delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> occorre sempre fare riferimento al numero di ricambi orari reale,  $N_r$ , poiché detta concentrazione è utilizzata dal metodo Rudnick e Milton come marcatore dell'attività di respirazione e pertanto deve sempre corrispondere al reale ricambio d'aria.

Contrariamente a quanto avviene per i metodi di Wells-Riley e Gammaitoni-Nucci, la funzione di sanificazione dei dispositivi aggiuntivi (filtri ad alta efficienza, lampade UV, deposito dei droplet e riduzione della vitalità virale) è valutata con un incremento fittizio del numero di ricambi d'aria virtuali che, per il metodo di Rudnick e Milton, può essere inserita solamente nell'espressione di calcolo della variazione oraria dei quanta e quindi indirettamente inserita nella (15).

L'azione di sanificazione prodotta dai dispositivi impiantistici serve sempre e solamente a ridurre il valore della produzione oraria dei quanta di infezione rispetto a quella che si avrebbe con il solo numero di ricambi orari reali.

In Figura 20 si può osservare l'andamento delle curve a tratto intero di  $q$  per effetto della sanificazione (assumendo  $L$  come numero di ricambi orari modificato) e senza sanificazione (assumendo  $N_r$  come numero di ricambi orari reali), curve tratteggiate.

Le differenze sono significative e incidono in modo rilevante nella riduzione del rischio di contagio aereo. Si osservi che l'azione della mascherina agisce direttamente sulla produzione oraria dei quanta, vedi equazione (10) indipendentemente dal valore di  $L$ .

### Benefici del calcolo dinamico con il metodo Rudnick e Miller

Il calcolo dinamico discreto vettorializzato porta alcuni benefici nella maggior precisione di calcolo. Se osserviamo la distribuzione oraria della concentrazione di CO<sub>2</sub> si ha l'andamento di Figura 21.

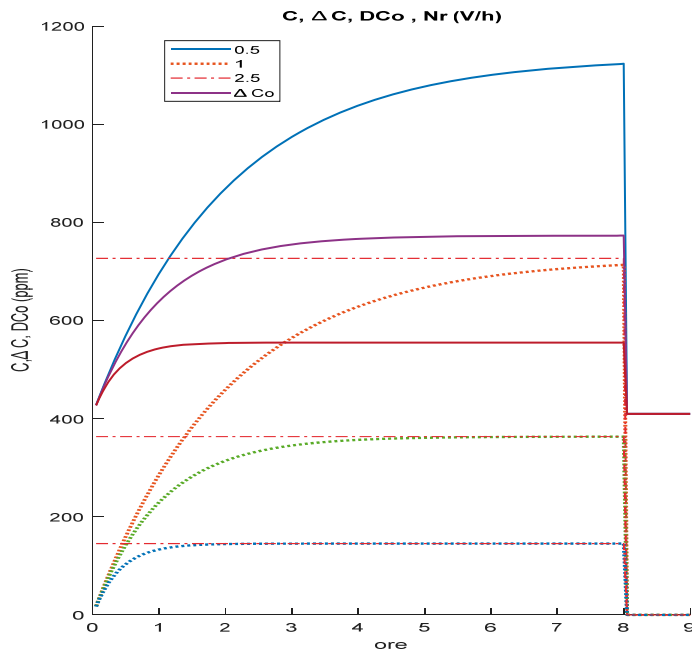
L'evoluzione del transitorio della concentrazione è più rapido per alti valori dei ricambi orari e più lento per bassi valori di  $N_r$ . In Figura 21 si osserva che per  $N_r = 0,5$  si va a regime dopo 9 ore mentre per  $N_r = 3,5$  dopo 2 ore.

Poiché il fattore  $f_m$  dipende dal rapporto  $\Delta C/C_a$  anche  $f_m$  avrà un transitorio che ricalca quello delle concentrazioni, come illustrato in Figura 22, sia per turno unico che per doppio turno con sanificazione, ove  $f_m$  è riportato a scala 1E5 per evidenziarlo nella stessa Figura.

Ne consegue che il calcolo dinamico effettuato con la relazione vettorializzata E) tiene conto della variabilità di  $f_m$  nel periodo iniziale transitorio che sarà tanto maggiore quanto minore è il numero dei ricambi orari.

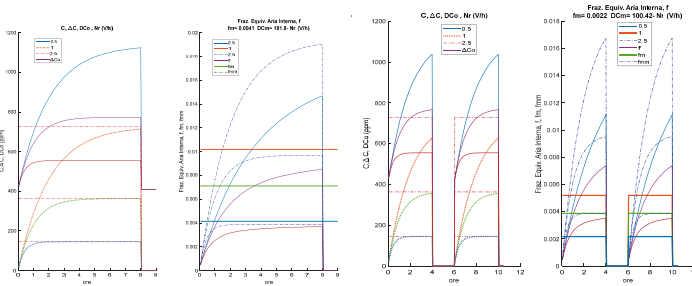
Nel caso di doppio turno di lavoro con sanificazione intermedia i transitori ripartono all'inizio di ogni turno e l'andamento delle concentrazioni e di  $f_m$  ne risentono di conseguenza.

Se si tiene conto anche della variabilità della distribuzione oraria



**Figura 21 – Distribuzione oraria della concentrazione di CO<sub>2</sub> per vari valori di Nr**

Figure 21 – Hourly distribution of the CO<sub>2</sub> concentration for various values of Nr



**Figura 22 – Andamento orario delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> e del valore medio fm per turno unico e doppio turno**

Figure 22 – Hourly trend of CO<sub>2</sub> concentrations and average fm value for single and double shift

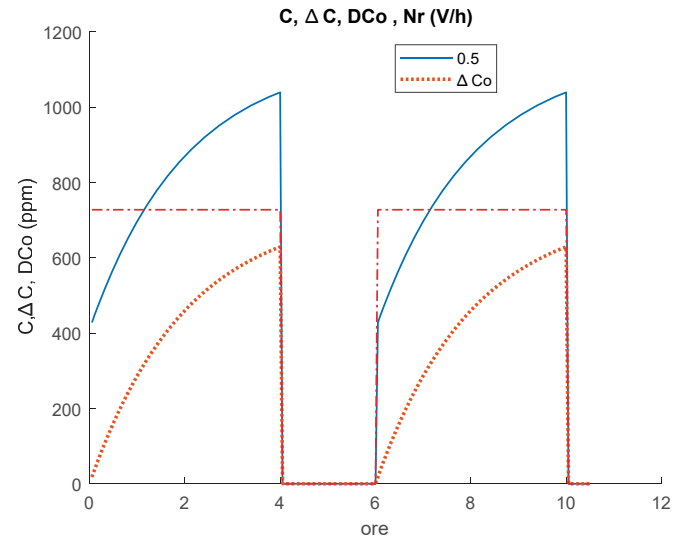
dei quanta, vedi figure precedenti, allora si comprende come la probabilità di contagio calcolata con la relazione vettorializzata E) in regime dinamico sia inferiore a quella calcolata con la relazione C) in regime costante.

In genere il regime stazionario calcola in eccesso il rischio di contagio mentre il regime dinamico lo calcola con maggior precisione ottenendo risultati più realistici. Analoga osservazione vale se si utilizzano i metodi di calcolo di Wells-Riley o di Gammaioni-Nucci.

Un'altra osservazione riguarda l'applicazione del metodo diretto di progetto, presentato in precedenza, nel quale si assume che la differenza ΔC sia calcolata dal rapporto fra la sorgente interna e la portata d'aria, cioè considerando il valore a regime dei transitori sopra considerati per le concentrazioni.

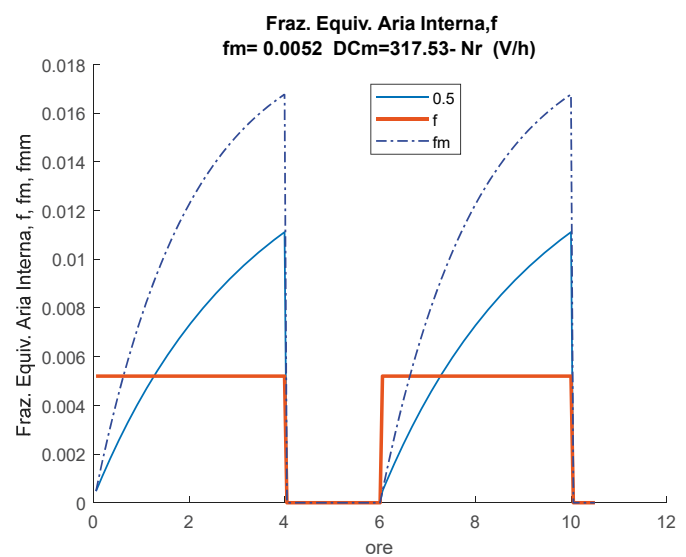
**BIBLIOGRAFIA**

[1] Wells, W.F.: "On airborne infection: study II. Droplets and Droplet nuclei". Am. J. Epidemiol. 20, 611–618, 1934, <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a118097>.  
 [2] S.N. Rudnick, D.K. Milton: "Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration", Indoor Air 2003; 13: 237–245.  
 [3] William G. Lindsley, John D. Noti, Francoise M. Blachere, Jonathan V. Szalajda2 and Donald H. Beezhold: "Efficacy of Face Shields Against Cough Aerosol Droplets from a Cough Simulator", J Occup Environ Hyg. 2014; 11(8): 509–518.



**Figura 23 – Confronto fra ΔC variabile e stazionaria**

Figure 23 – Comparison between variable and stationary ΔC



**Figura 24 – Confronto fra fattore f stazionario e fm dinamico**

Figure 24 – Comparison between stationary f factor and dynamic fm

Il confronto fra ΔC variabile in regime dinamico e quello di regime stazionario è dato in Figura 23. Il valore limite stazionario è sempre più elevato rispetto a quello variabile in modo sensibile.

Imponendo ΔC stazionaria si fa un fattore f stazionario dato dal rapporto ΔC/C<sub>a</sub> mentre in regime dinamico f varia istante per istante e se ne deve calcolare il valore medio fm. Nella successiva Figura 24 si ha il confronto fra i due casi.

Ancora una volta il metodo stazionario sopravvaluta i parametri di calcolo e la stessa probabilità di rischio di contagio individuale.

[4] Riley, E. C., Murphy, G. & Riley, R. L.: "Airborne spread of measles in a suburban elementary school", Am. J. Epidemiol. 107, 421–432, 1978.  
 [5] Gammaioni L, Nucci MC: "Using a mathematical model to evaluate the efficacy of TB control measures", Emerg. Infect Dis 1997; 3(3):335-342.  
 [6] G. Buonanno, L. Stabile, L. Morawska: "Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment", Environment International 141 (2020) 105794.