



La importancia de una buena ventilación

(antes, durante y después de una pandemia global)

Modelo de análisis de riesgo de contagio por aerosoles

Diaz Carrasquer, Albert J

Ingeniero CFD - Laboratorio de aerodinámica y acústica
S&P Research SLU
Soler & Palau Ventilation Group

Lanuza Fabregat, Jordi

Ingeniero CFD - Laboratorio de aerodinámica y acústica
S&P Research SLU
Soler & Palau Ventilation Group

1 Resumen

Desde el comienzo de la pandemia mundial por la COVID-19, ha existido un consenso internacional en cuanto a las medidas para reducir la transmisión del virus: distanciamiento social, higiene de manos y uso de mascarilla. Estas medidas son consecuencia de las vías aceptadas de contagio: contaminación por inhalación de gotículas y por contacto directo con superficies contaminadas. Sin embargo, existe un creciente número de escenarios de contagio donde la transmisión no puede explicarse por los mecanismos mencionados anteriormente pero sí mediante la transmisión por aerosoles. En ese sentido, las diferentes autoridades sanitarias han comenzado a aceptar dicha transmisión como una vía de contagio muy probable -según recoge la bibliografía más reciente-, y por consiguiente, se ha incluido también la ventilación como medida fundamental de reducción de la transmisión. Este hecho ha introducido en la sociedad un intenso debate respecto a la mayor conveniencia de la ventilación natural o de la ventilación mecánica. La ventilación natural (considerada en este estudio como ventanas abiertas) presenta la aparente ventaja de un supuesto coste cero, a expensas de sacrificar el impacto en la eficiencia energética (y de olvidar los compromisos internacionales de lucha contra el cambio climático), el confort térmico de las personas, la presencia elevada de contaminantes en el aire en entornos urbanos y la falta de control de su funcionamiento real.

A pesar de ello, el presente estudio se centra en comparar ambos tipos de ventilación únicamente en cuanto a su eficacia para reducir la probabilidad de contagio por aerosoles. A nivel de ventilación natural se simula el caudal de renovación generado abriendo ventanas y a nivel de ventilación mecánica el caudal de renovación estipulado por el Reglamento para Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE). En este estudio se analizan tres posibles escenarios de contagio: una escuela, un bar/restaurante y una oficina, con sendas densidades de ocupación y características del evento (tiempo de exposición, caudales respiratorios, etc.) similares a situaciones reales. Para relacionar la concentración de aerosoles en el ambiente con las probabilidades de infección se emplea el modelo de Wells-Riley. Los caudales de exhalación de partículas infecciosas ($\text{quanta} \cdot \text{h}^{-1}$) se obtienen de literatura referenciada más adelante. Se analizan las concentraciones de partículas infecciosas, así como las probabilidades de infección en función de los caudales de renovación para diferentes tiempos de exposición. Si bien es cierto que para obtener una probabilidad de infección inferior habría que aumentar los caudales por encima de lo indicado por el RITE (una normativa que no se calculó teniendo en cuenta un evento de contagio por aerosoles), se concluye que el caudal de renovación asociado a la ventilación mecánica cumpliendo el RITE logra reducir hasta más de tres veces el riesgo de infección respecto al caso de la ventilación natural (abrir ventanas).

2 Introducción

El 31 de diciembre del 2019 se notificó a la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre una serie de casos de neumonía vírica en Wuhan. El 9 de enero de 2020 se determina que el brote está provocado por un nuevo coronavirus (SARS-CoV-2) [1]. Rápidamente se convocaron las primeras reuniones para analizar este nuevo

virus y el 11 de enero se obtiene la secuencia genética de este [1]. Primero se dudó sobre la posible transmisión del virus entre humanos, pero el día 21 de enero se pudo confirmar [1]. Sin embargo, no es hasta el 11 de marzo que la OMS declaró el inicio de la pandemia [1].



En un principio la OMS sugiere el distanciamiento social, el uso de mascarillas y el lavado de manos como las mejores herramientas para combatir el virus, dado que el mecanismo considerado por la OMS como el método de transmisión del virus [2] es el contacto directo de las mucosas de la nariz, ojos o boca con las gotas/partículas infectadas. Estas partículas pueden provenir de:

1. Partículas que se emiten al hablar, respirar o estornudar. De esta manera parece poco probable la transmisión a través de estas gotas a distancias mayores de dos metros.
2. Superficies contaminadas por estas gotas, que terminan en nuestras mucosas por contacto directo. Para este caso, se estudia el tiempo que el virus puede sobrevivir sobre diferentes materiales.

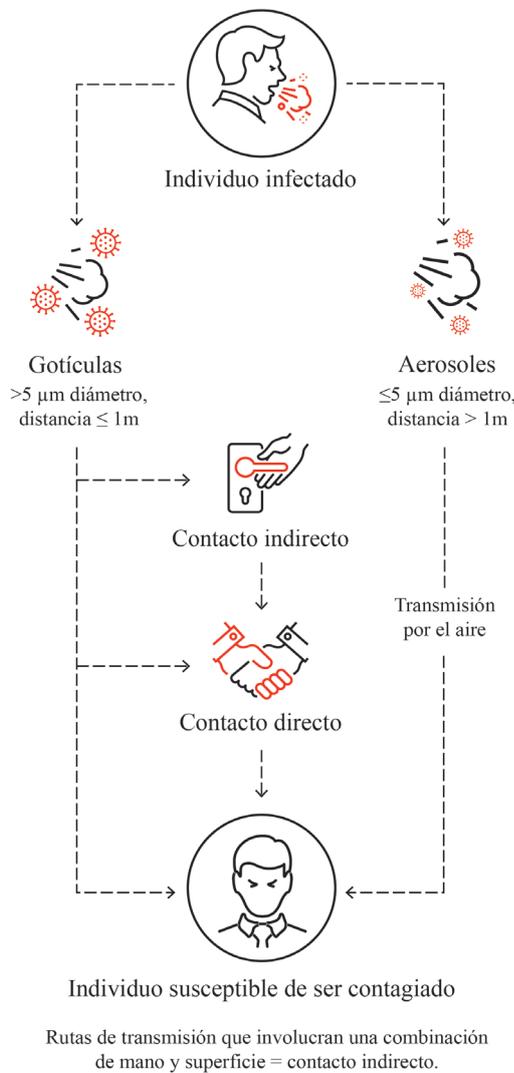


Figura 2.1. Métodos de Transmisión COVID-19 (inspirado en [3]).

Por tanto, en un principio, todos los Estados apostaron por estas medidas para paliar la alta transmisibilidad del virus. Sin embargo, al poco tiempo, muchos científicos empiezan a alertar de la posibilidad de la transmisión del virus mediante aerosoles ([4], [5], [6]). Los aerosoles son partículas más pequeñas que las mencionadas anteriormente que no caen tan rápidamente y se quedan flotando en el ambiente durante un tiempo elevado. Estos aerosoles se distribuyen rápidamente por las salas y, al igual que las gotículas ya mencionadas, los aerosoles también pueden tener carga viral. Diferentes estudios han detectado la presencia de SARS-CoV-2 en aerosoles [7]. La importancia de este método de transmisión se visualiza al considerar que una persona adulta respira de media entre 18.000 y 20.000 veces al día, respirando (y filtrando) unos 8.000 litros de aire cada día, por lo que se inhalan una gran cantidad de aerosoles presentes en el ambiente.

La importancia de la transmisión por aerosoles adquiere mayor relevancia a partir del estudio de varios eventos ([8], [9], [10]) donde los mecanismos de transmisión descritos y aceptados por la OMS no permitían explicar el alto número de contagios derivados de dichos eventos.

A partir de este tipo de eventos, el Prof. José L. Jiménez de la Universidad de Colorado desarrolló un modelo para estimar la transmisión de la COVID-19 por aerosoles [5]. El Prof. Jiménez y otros muchos científicos ([4], [11], [12]) llevan ya mucho tiempo tratando de concienciar a las autoridades de la importancia de la transmisión del virus por aerosoles. Finalmente, la OMS incluyó los aerosoles como método de transmisión de la COVID-19 en situaciones específicas el pasado octubre [13].

Queda fuera del alcance de este artículo profundizar en todos los métodos de transmisión, centrándose únicamente en la importancia de los aerosoles como método de transmisión que ni la distancia social ni el lavado de manos puede evitar.

Este artículo parte del análisis del modelo expuesto en [5], sobre el que se añaden nuevas funcionalidades y que se implementa en Python para obtener la máxima flexibilidad en cuanto a los casos de estudio y a la visualización de los resultados. El objetivo es doble: primero, analizar el

riesgo de contagio si hay una persona infectada en una sala conocida (volumen, cantidad de renovaciones de aire, número de personas...); segundo, poder dimensionar correctamente la ventilación de las salas dependiendo del tipo de evento que acojan y la duración.

De esta manera, se tratará de responder a la pregunta ¿es suficiente la ventilación natural (entendida como abrir ventanas)? ¿O es necesario forzar la ventilación con la ayuda de un sistema de ventilación? Por otro lado, ¿es suficiente ventilar siguiendo los requisitos normativos vigentes? Para ello, se analizarán tres ejemplos diferentes (un aula de un colegio, un bar/restaurante pequeño y una sala de oficinas).

El presente trabajo pretende, por un lado, concienciar a todos los usuarios y a las administraciones públicas de la importancia de una correcta ventilación siempre: antes, durante y después de una pandemia global, y, por otro, validar si el marco normativo vigente, bien aplicado, es suficiente para reducir hasta niveles aceptables la posibilidad de contagio por aerosoles.

3 Análisis de Riesgo

3.1. Introducción al Modelo

3.1.1. Conceptos Clave

A continuación se describirán una serie de conceptos:

- **Quanta:** dosis del patógeno en aerosol, la inhalación de la cual conduce a una infección con una probabilidad del 63,3%. Discreto y presente en muy bajas concentraciones, análogo a una partícula de aerosol cargada de patógenos.
- **Tasa de exhalación de quanta:** tasa a la cual una persona infectada emite quanta en el aire exhalado. Depende del grupo de edad y la actividad física [14] [15].

- **Caudal respiratorio:** es el caudal de aire que una persona inhala y exhala. Depende del grupo de edad y la actividad física.
- **Quanta inhalados:** quanta totales inhalados por persona dado un tiempo de exposición debido a la respiración.
- **Efectividad mascarilla:** efectividad con la que una mascarilla previene la inhalación de quanta presentes en el ambiente y con la que previene la liberación de quanta al ambiente por parte de la persona infectada [16].
- **Probabilidad de infección:** probabilidad de una persona de infectarse dependiendo de los quanta totales inhalados.
- **Media temporal de la concentración de quanta:** para calcular la probabilidad de infección, el modelo usa la concentración de quanta equivalente a tener una concentración constante de quanta durante la duración del evento.
- **Probabilidad acumulada:** considerando múltiples repeticiones del mismo evento o bien un evento con tramos no equiprobables, corresponde a la probabilidad de infectarse durante el primer evento combinada con la probabilidad de infección durante el segundo evento (condicionada a no haberse infectado durante ninguno de los eventos anteriores) y así sucesivamente para todos los tramos o eventos.

3.1.2. Estándares de ventilación

Para poder responder a la pregunta ¿es necesario ventilar más?, se necesita saber lo que dice la norma para las diferentes situaciones que se analizarán. En España, el reglamento que rige la cantidad de renovaciones necesarias para asegurar la calidad del aire interior es el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [17].

El RITE establece unos requisitos de caudal de aire exterior (renovación) para asegurar la calidad del aire interior para diferentes supuestos (Tabla 1.4.2.1 de [17]):

- En el caso de un aula de enseñanza y una sala de

oficinas, pertenecientes a la categoría IDA 2, se establece un caudal de renovación mínimo de $12,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ o $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ por persona.

- En el caso bares/restaurantes, perteneciente a la categoría IDA 3, se establece un caudal de renovación mínimo de $8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ o $28,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ por persona.

Si bien es cierto que el RITE permite incrementar los caudales de renovación en función de la tasa metabólica de los ocupantes [18], tales incrementos no se han aplicado en los casos estudiados en este artículo.

3. 2. Modelo Analítico

La herramienta aquí expuesta se basa en lo que se conoce en el ámbito de la química y las ciencias atmosféricas como “*One Box Model*”. Se trata de una modelización simplificada del equilibrio de una especie química como si se encontrara en el interior de un recinto cerrado (una “caja”, en este caso). El modelo utilizado asume que la especie se distribuye uniformemente en el recinto y de forma instantánea, por lo que no se pretende resolver su distribución espacial sino su concentración total en el recinto, que depende de los siguientes factores:

- **Flujo entrante y saliente del recinto:** correspondería, en nuestro caso, al caudal de renovación, tanto para impulsión como para extracción. Se denota como F_{in} y F_{out} , en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.
- **Emisiones:** la cantidad de especie química que se genera por aportación directa al ambiente. Se denotan como E , en h^{-1} .
- **Producción química:** la cantidad de especie química que se genera a partir de reacciones químicas entre otras especies. Se denota como P , en h^{-1} .
- **Pérdida química:** la cantidad de especie que se elimina debido a la temperatura ambiente, nivel de radiación UV, interacción con otras especies, etc. Se denota como L , en h^{-1} .

- **Deposición:** la cantidad de especie que se elimina por deposición en superficies. Se denota como D , en h^{-1} .

Cabe destacar que tanto las ganancias como pérdidas de la especie química se han modelado como primer orden, con lo que se asume que son independientes de la concentración de quanta presente en el recinto. Así, a partir del ya citado “*One Box Model*”, el flujo entrante y saliente se puede convertir en una pérdida (número de renovaciones por hora) y se puede combinar con el resto de las pérdidas en un factor λ correspondiente a:

$$\lambda = \frac{F_{out}}{V} + D + L$$

Con $F_{in} = F_{out}$, donde V corresponde al volumen del recinto estudiado y considerando que el caudal de renovación introduce solamente aire limpio. En este caso se omiten las ganancias por producción química ya que las partículas infecciosas no se pueden generar mediante reacciones químicas entre el resto de especies presentes en el ambiente. Así, la concentración de quanta en función del tiempo, $C(t)$, se modela en la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{E}{V} - \lambda C(t)$$

La ecuación diferencial se resuelve analíticamente para encontrar la función $C(t)$ y resulta en:

$$C(t) = C_0 e^{-\lambda t} + \frac{E\eta}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t})$$

Con η representando la eficiencia de las mascarillas usadas y C_0 la concentración de quanta inicial. Para calcular la probabilidad de infección durante un intervalo se requiere obtener el valor medio de concentración mediante integración:

$$\bar{C} \Big|_{t_0}^{t_1} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_1} C(t) dt = \frac{C_0}{\lambda \Delta t} (1 - e^{-\lambda \Delta t}) + \frac{E\eta}{\lambda V} \left[1 - \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - e^{-\lambda \Delta t}) \right]$$

Al introducir la eficiencia de la mascarilla η , la fracción de personas con mascarilla f y el caudal de respiración Q , se obtiene la cantidad de quanta inhalados:

$$q_{inh} = \bar{C} \Big|_{t_0}^{t_1} Q \Delta t (1 - f \eta)$$



Finalmente, se puede calcular la probabilidad para un único evento o intervalo aplicando la ecuación de Wells-Riley:

$$p = 1 - e^{-q_{inh}}$$

Si se quiere calcular la probabilidad acumulada después de un evento con varios intervalos o bien múltiples repeticiones del mismo evento, se debe de calcular por separado la probabilidad de infección para cada evento o intervalo y combinarlas según:

$$p = p_0 + \sum_{i=1}^n \left(p_i \prod_{k=0}^{i-1} (1 - p_k) \right)$$

Donde los sufijos i y k representan las probabilidades correspondientes al i -ésimo y al k -ésimo intervalo, respectivamente.

3. 3. Utilidad – Aplicación en el Sector

Con lo expuesto anteriormente, se puede entender la gran utilidad de este modelo para tratar de analizar el riesgo de contagio dado un evento. Además, este modelo puede ser de gran utilidad para el sector de la ventilación ya que permite:

1. Analizar el riesgo: el primer uso es el ya descrito anteriormente. Es una buena herramienta para conocer el riesgo de infección dadas las condiciones actuales de la sala.
2. Dimensionar instalaciones de ventilación: fijando las condiciones de la sala (número de personas, dimensiones, eficiencia mascarillas, actividad...) y fijando el riesgo de infección que se estaría dispuesto a asumir, se pueden obtener las renovaciones de aire necesarias para llegar a esa probabilidad.
3. Analizar el riesgo relativo de diferentes tipos de instalaciones: dadas dos instalaciones diferentes con caudales distintos se puede obtener la probabilidad de infección de cada una de ellas, siempre asumiendo que hay un infectado en la sala.

4 Casos de Estudio

Se van a analizar varias configuraciones diferentes para cada caso (aula, bar/restaurante y oficina). Pero fijándose en las renovaciones de aire se harán:

1. Ventilación natural: se asume un caudal de ventilación natural equivalente a 0,75 renovaciones de aire por hora. Como se puede ver en [19] [20], la ventilación natural puede variar mucho dependiendo de las condiciones exteriores. Por tanto, el valor escogido es solo una referencia para poder analizar una configuración con ventilación natural. Se ha considerado ventilación natural a las recomendaciones oficiales de abrir ventanas.
2. Ventilación definida por el RITE.
3. Ventilación necesaria para reducir al 1% de probabilidad de infección [21].

4. 1. Información Relevante

En este apartado se detallan los parámetros del modelo que son constantes o extraídos de la literatura consultada para todos los estudios llevados a cabo. En la Tabla 4.1 se sintetizan las variables características de cada uno de ellos.

Para las pérdidas de primer orden, es decir, las pérdidas por deposición y por pérdida química, se toma $D = 0,3$, $L = 0,56$ (ver 3.2) de acuerdo con las recomendaciones dadas por [22] y [23], respectivamente.

En cuanto a la eficacia de las mascarillas, se contempla en todos los casos una eficacia del 50%, tal y como se recomienda en [16]. Pese a que la eficacia teórica de las mascarillas es mucho mayor (>95% para las FFP2, por ejemplo), se ha demostrado [16] que, al no ajustar herméticamente a la cara, se producen filtraciones de aire tanto inhalado como exhalado por lo que no todas las partículas en suspensión quedan retenidas en la mascarilla.

Por lo que respecta a los caudales de respiración, estos se han ajustado en función de la edad y la actividad física según lo recomendado por el estándar 62 de ASHRAE [24]. Para el aula, el caudal de respiración es menor al tratarse de niños en vez de adultos. En cuanto a la tasa de exhalación de quanta, que representa el parámetro con mayor variabilidad, se toman valores de acuerdo con lo estipulado en [14] y [15]. En concreto, en el caso del aula

se distinguen diferentes tasas para profesor y alumno. En el caso del bar, el camarero exhala mayor número de quanta debido a que se encuentra haciendo ejercicio físico (mayor tasa metabólica).

A continuación, se presenta la Tabla 4.1 con los principales parámetros para los casos estudiados.

	Volumen [m ³]	N. personas	Caudal de respiración [m ³ /h]	Tasa de exhalación de quanta [quanta/h]
Aula	192	24	0,66	25/12,5
Bar - 1	270	35	0,72	38,3
Bar - 2	270	35	0,72	25
Oficina	780	40	0,72	25

Tabla 4.1. Parámetros característicos de los casos estudiados.

4. 2. Aula

Uno de los casos interesantes a estudiar es el de una escuela. Para ello se toma un aula de dimensiones 8 x 8 x 3m con 24 alumnos y un profesor, al que se considera infectado, donde todos ellos llevan mascarilla. Para recrear los tiempos de ocupación de las aulas, se asume que se realizan 2 horas de clase por la mañana seguidas de 30 minutos de recreo y otras 2 horas de clase. A continuación, se realiza una pausa de 2 horas para el almuerzo tras el cual se retoman las clases durante otras 2 horas. Cabe mencionar que, para los intervalos donde se vacía el aula, la concentración de dosis infecciosas en el ambiente se reduce progresivamente al no existir nuevas aportaciones.

La Figura 4.1 muestra la evolución de la concentración de dosis infecciosas a lo largo del tiempo para las renovaciones por hora seleccionadas anteriormente. Se observa que un mayor número de renovaciones por hora provoca tanto que la concentración de equilibrio se alcance más rápido como que el valor de equilibrio sea menor.

Se puede concluir también que, cumpliendo como mínimo con las renovaciones por hora (ACH) recomendadas por el RITE, se consigue eliminar prácticamente la totalidad del virus en las pausas establecidas mientras que esto no es posible solo con ventilación natural.

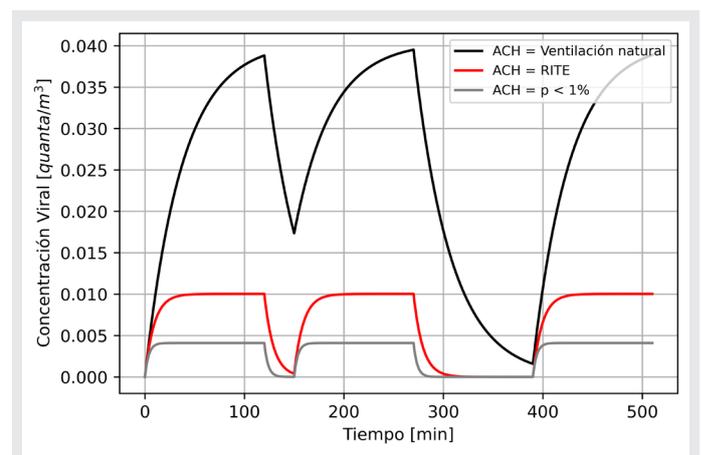


Figura 4.1. Evolución temporal de la concentración para diferentes niveles de renovaciones de aire por hora.

Una vez analizada la concentración de dosis infecciosas en el ambiente, se procede a calcular la probabilidad acumulada de infección en función de las renovaciones por hora disponibles. En la Figura 4.2, se puede apreciar la evolución de dicha probabilidad al final de los intervalos planteados anteriormente.

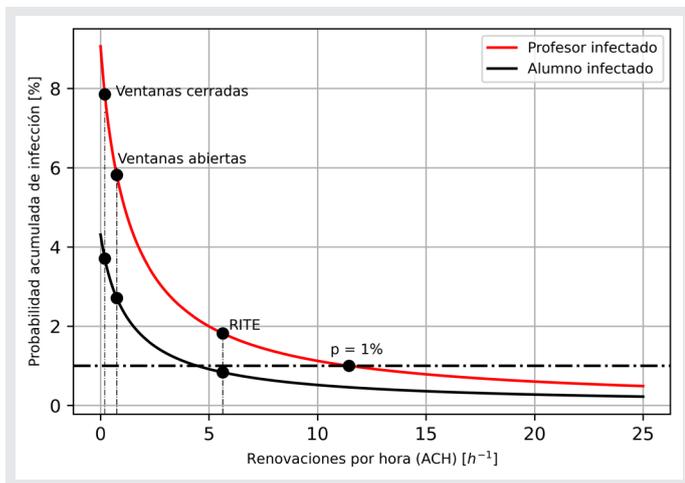


Figura 4.2. Evolución de las probabilidades de infección para diferentes niveles de renovaciones de aire por hora.

Para el caso de ventilación natural, la probabilidad de infección es de aproximadamente un 6%, lo que significa que se contagiaría un alumno al final de la jornada escolar. Para el caso de las renovaciones por hora indicadas en el RITE, con las que se obtiene una probabilidad de contagio tres veces menor que con ventilación natural (abriendo ventanas), y para las correspondientes a una probabilidad del 1%, no se produciría ningún contagio entre el alumnado.

Sin embargo, con la hipótesis de que el profesor acudiera al aula durante 4 días siendo infeccioso (hipótesis razonable dado el tiempo que se tarda en manifestar síntomas): con ventilación natural, la probabilidad acumulada se situaría en el 21%; con las renovaciones por hora establecidas por el RITE, la probabilidad se sitúa en aproximadamente un 7%, mientras que para la cantidad de renovaciones por hora correspondientes a la probabilidad del 1% se situaría en el 4%. Si se calcula de nuevo el número de alumnos contagiados al cabo de 4 días se desarrollarían 5, 2 y 1 contagios, respectivamente.

Si se considera el caso sin ventilación, solo considerando las posibles fugas (se ha contado como 0,2 ACH [19] [20]), se ve que el riesgo de infección diario aumenta hasta el 7,8%. Esto implica que al final de la jornada se contagiarían 2 alumnos y, pasados 4 días, 7 alumnos.

Otro caso interesante de estudiar es el de un alumno infectado. En este caso, debido a que la cantidad de quanta exhalado por el alumno será del orden de la mitad, las probabilidades de infección también lo serán (ver Figura 4.2). Si se considera el número de alumnos infectados al final del día, se acabarán contagiando 1 y 0 alumnos respectivamente para el caso con ventilación natural y con la ventilación marcada por el RITE. Si se considera la cantidad de contagios antes de que el alumno manifieste síntomas (4 días) serían 2 y 1.

Por último, se ha considerado añadir un caso replicando las recomendaciones institucionales publicadas tras la ola de frío. Se aconseja aplicar una estrategia de “ventilación intermitente”, por la que se abren las ventanas durante 10 minutos al final de cada hora. Así, se han modificado los tramos definidos para este caso para satisfacer la secuencia de 50 minutos de ventanas cerradas y 10 minutos de ventanas abiertas, considerando que en los tramos en que el aula está desocupada (desayuno y almuerzo), se mantienen las ventanas abiertas todo el tiempo. En el caso de las ventanas cerradas, se ha considerado un caudal de renovación equivalente a las posibles fugas en el aula de 0,2 ACH [19] [20], mientras que, con las ventanas abiertas, se ha considerado un caudal de 8 ACH. Se ha escogido este caudal ya que fue el caudal máximo conseguido en un aula con la ayuda de un sistema de climatización y ventiladores [20].

Por tanto, el resultado obtenido será la probabilidad de infección en un caso muy favorable en términos de renovación del aire. Como se ha visto en [19], la variabilidad de los caudales de renovación a la que está sujeta la ventilación natural es muy alto y no controlado.

La Figura 4.3 detalla la evolución de la concentración en este escenario de “ventilación intermitente” (de nuevo con el profesor infectado) y lo compara al caso en que se

cumple con los requisitos normativos. Se comprueba que las concentraciones máximas alcanzadas, aplicando lo estipulado en el RITE para este caso (entre 5 y 6 renovaciones por hora), son aproximadamente tres veces inferiores a las alcanzadas por la “ventilación intermitente”. Adicionalmente, las probabilidades de infección para este nuevo escenario se sitúan en el 4,8%. Así, se produciría 1 contagio al final del día y 4 al cabo de 4 días, frente a los 0 y 2 que se producirían con la ventilación estipulada por el RITE.

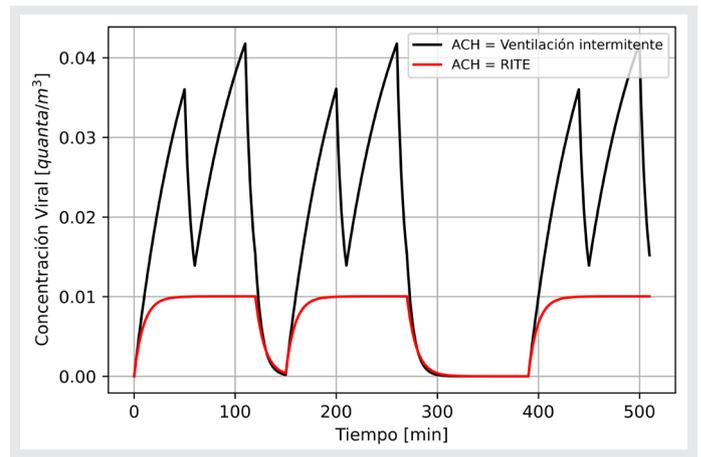


Figura 4.3. Evolución temporal de la concentración para diferentes niveles de renovaciones de aire por hora.

4.3. Bar/Restaurante

Se analizan ahora dos casos plausibles en un bar/restaurante. Se asume un local de 90 m² de superficie, con un volumen total de 270 m³, un aforo de 35 clientes, todos sin mascarilla, y un camarero, con mascarilla. El servicio del restaurante se divide en dos turnos de 2 horas cada uno tras cada uno de los cuales se renueva la clientela. En el primer caso se toma a uno de los camareros como infeccioso, portando mascarilla. En el segundo caso se considera que uno de los clientes del primer turno está infectado y que no hay ningún cliente infectado en el segundo turno.

Puesto que entre el primer y el segundo turno se renueva la clientela, se deben de considerar por separado las probabilidades de infección de cada uno, ya que al principio del primer turno el ambiente está libre de quanta mientras que al inicio del segundo turno hay una concentración de quanta dependiente de la cantidad de renovaciones de aire. Así, en la Figura 4.4 se puede observar la evolución de la concentración de quanta respecto del tiempo para los dos casos considerados.

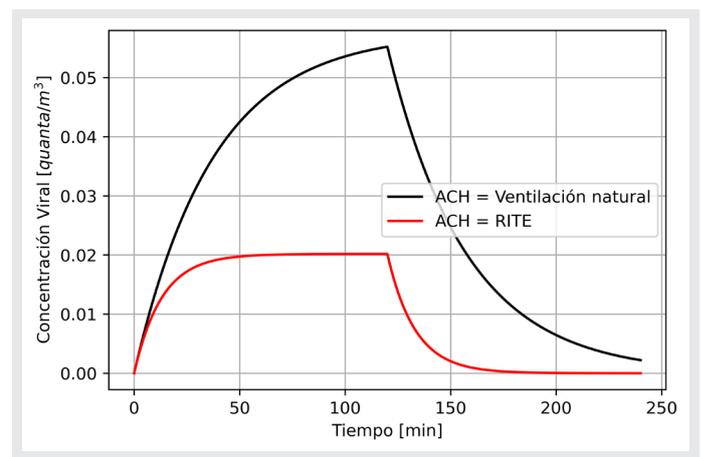
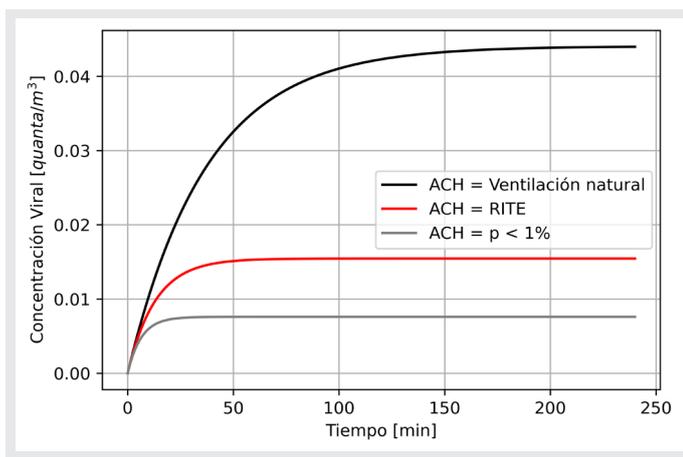


Figura 4.4. Evolución temporal de la concentración para diferentes niveles de renovaciones de aire por hora. A la izquierda para el caso del camarero infectado y a la derecha para el caso del cliente infectado en el primer turno.

La Figura 4.5 recoge la evolución de la probabilidad de infección para cada turno en función de las renovaciones por hora para cada uno de los casos a considerar. Para el primer caso, se comprueba que a mayor número de renovaciones la concentración de equilibrio se alcanza más rápido, por lo que la diferencia de probabilidades entre el primer y el segundo turno se va reduciendo con el incremento de renovaciones hasta hacerse despreciable.

En el segundo caso, aunque la diferencia de probabilidades entre el primer y el segundo turno también se reduce con el número de renovaciones por hora, dicha diferencia es mucho mayor ya que durante el segundo turno no existe aportación alguna de quanta al ambiente.

En el segundo caso, se observa que no se ha añadido la curva de probabilidad del 1% ya que con el RITE se satisface este criterio.

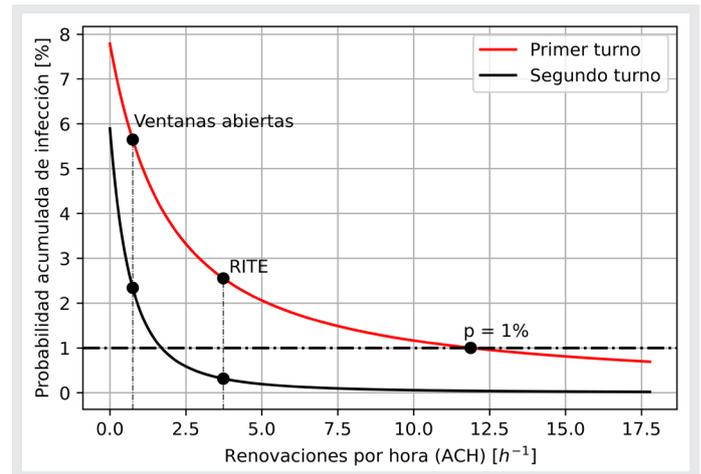
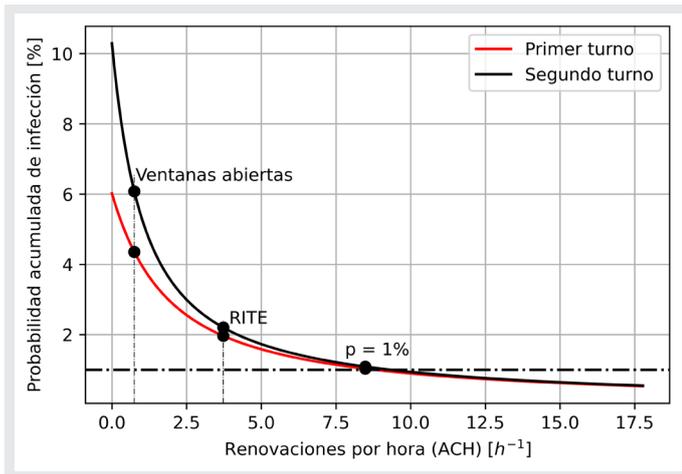


Figura 4.5. Evolución de las probabilidades de infección para distintos niveles de renovaciones de aire por hora para el primer y segundo turno. A la izquierda para el caso de un camarero infectado y a la derecha para el caso de un cliente infectado en el primer turno.

Se puede concluir de forma cuantitativa que para el caso de clientes de un restaurante comiendo sin mascarilla, es fundamental disponer de un adecuado sistema de ventilación para asegurar que, en el caso de que un cliente infectado acudiera al local, su aportación de dosis infecciosas al ambiente se disipe lo más rápido posible y reducir considerablemente el riesgo para los clientes del turno posterior.

Se observa que, al igual que en el caso del aula, si se cumple con la cantidad de renovaciones hora marcada por el RITE, se reduce a más de la mitad el riesgo de infección. En cuanto a los contagios y considerando para cada caso los caudales de ventilación natural, renovaciones establecidas por el RITE y renovaciones necesarias para obtener una probabilidad equivalente del 1%, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 4.2

	Caso 1: Camarero infeccioso con mascarilla			Caso 2: Comensal del 1er turno infeccioso sin mascarilla		
Ventilación	Natural	RITE	<1%	Natural	RITE	<1%
Primer Turno	2	1	0	2	1	0
Segundo Turno	2	1	0	1	0	0

Tabla 4.2. Número de personas contagiadas en el caso del bar/restaurante.



4.4. Oficinas

Se plantea ahora estudiar las probabilidades de infección en una oficina de 260 m² y 780 m³ de volumen, ocupada por 40 trabajadores (uno de los cuales es infeccioso) durante una jornada intensiva de 7h para diferentes niveles de ventilación. Se distingue entre un caso donde todos los trabajadores llevan mascarilla y otro donde los trabajadores no llevan mascarilla.

En la Figura 4.6 se observa que las concentraciones de equilibrio para los mismos niveles de ventilación son el doble de altas cuando los trabajadores no llevan mascarilla que cuando la llevan (para los casos donde las renovaciones están fijadas).

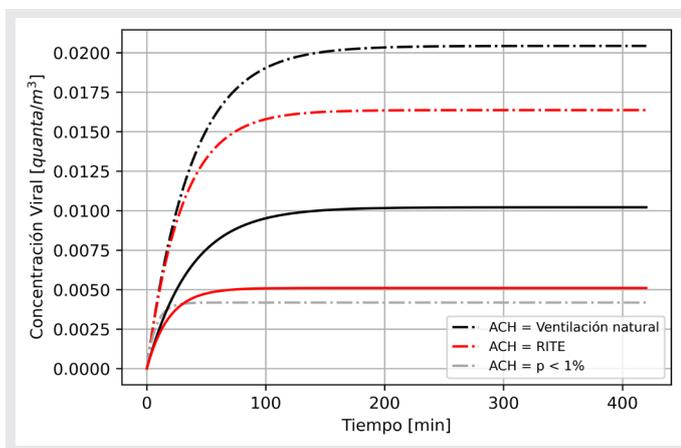


Figura 4.6. Evolución temporal de la concentración para diferentes niveles de renovaciones de aire por hora (las líneas continuas corresponden al caso con mascarillas).

Se decide no incluir la curva de concentración para el caso con mascarilla y probabilidad del 1% ya que se obtiene una curva muy aproximada a la obtenida en el caso del RITE y uso de la mascarilla.

En cuanto a las probabilidades, recogidas en la Figura 4.7 se observa que la mascarilla tiene un efecto considerable en cuanto a la reducción de probabilidades de infección, especialmente palpable si se comparan el número de renovaciones por hora necesarias para alcanzar una probabilidad menor al 1% con mascarilla y sin mascarilla.

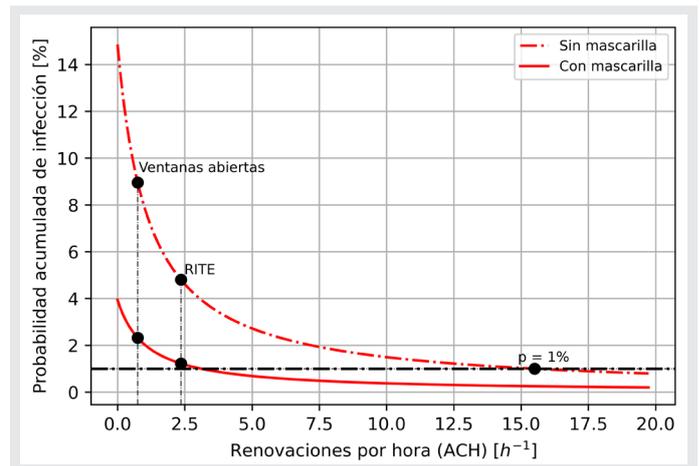


Figura 4.7. Evolución de las probabilidades de infección para diferentes niveles de renovaciones de aire por hora y trabajadores con y sin mascarilla.

Así, con los trabajadores sin mascarilla se producirían 4, 2 y 0 contagios respectivamente para ventilación natural, las renovaciones estipuladas por el RITE y las necesarias para alcanzar una probabilidad inferior al 1%. En cambio, si los trabajadores llevaran la mascarilla se producirían 1 contagio para ventilación natural y 0 para las renovaciones estipuladas por el RITE (que en ese caso equivalen aproximadamente al 1%).

Ahora, se retoma la hipótesis planteada en el estudio del aula y se asume que uno de los trabajadores acude 4 días seguidos a la oficina siendo infeccioso. En este caso, sin la mascarilla se producirían 13, 7 y 2 contagios respectivamente para ventilación natural, las renovaciones estipuladas por el RITE y las necesarias para alcanzar una probabilidad inferior al 1%. Con las mascarillas, sin embargo, las cifras de contagios se reducirían a 4 para la ventilación natural y 2 para las renovaciones estipuladas por el RITE.

4.5. Sensibilidad de los resultados

El modelo utilizado en este artículo resulta especialmente apropiado para realizar estudios de naturaleza relativa o comparativa, es decir, para comparar el impacto que tiene tomar diferentes medidas en cuanto a la mitigación del riesgo de infección.

Son bastantes los parámetros sujetos a variabilidad e incertidumbre, por ejemplo, los ratios de inactivación y deposición de las partículas. También conlleva cierta incertidumbre el caudal respiratorio, pues pese a estar modelado de acuerdo a la edad y el tipo de ejercicio, también depende de variables metabólicas y pulmonares que son tanto difíciles de cuantificar como de generalizar. Sin embargo, y como se demuestra en la literatura ([14] y [15]), el parámetro con mayor incertidumbre es la tasa de quanta exhalado. En concreto, se proponen valores que van desde pocas decenas de quanta por hora hasta prácticamente un millar si se trata de un supercontagiador.

Por lo anterior, cabe mencionar que las probabilidades obtenidas por el modelo no deben tomarse como una predicción exacta si no como una indicación del orden de magnitud. Para demostrarlo, se toma el caso de la oficina. Se consideran dos variables, las renovaciones de aire por hora y la tasa de exhalación de quanta. En vez de obtener una curva de probabilidades se quiere ahora observar una nube de puntos para diferentes combinaciones de tasas de exhalación y número de renovaciones.

Las renovaciones de aire por hora se modelan como una distribución uniforme acotada entre dos valores arbitrarios (0 y 6 renovaciones) donde todos los posibles valores son equiprobables. En cambio, la tasa de exhalación de quanta se modela como una distribución normal con media 25 quanta·h⁻¹ y varianza tal que los valores de 0 quanta·h⁻¹ y 50 quanta·h⁻¹ aparezcan con una probabilidad equivalente a 3σ.

La Figura 4.8 presenta los resultados de un estudio estadístico tomando N=10.000 puntos, tanto de renovaciones por hora como de tasa de exhalación de quanta, para los que se calcula la probabilidad de infección. En el caso del muestreo de puntos para las renovaciones por hora, al tratarse de una distribución uniforme, se pueden tomar puntos puramente aleatorios. En cambio, para la tasa de exhalación de quanta se toman los puntos de acuerdo con su función de densidad de probabilidad, por lo que durante el muestreo se obtienen más puntos cercanos a la media que a los extremos de la distribución.

A partir de lo anterior, se calculan las tasas de exhalación de quanta que permiten acotar la nube de puntos obtenida y se

comprueba cuál es la posible variabilidad en los resultados para la modelización de los parámetros escogida.

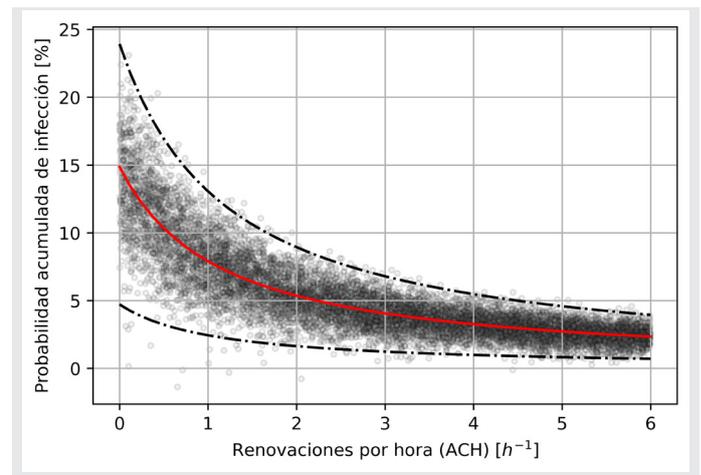


Figura 4.8. Resultados del análisis estadístico con N=10000 para combinaciones de la tasa de exhalación de quanta (distribución normal) y las renovaciones por hora (distribución uniforme).

Se concluye que la variabilidad es menor a mayor número de renovaciones hora, resultado concordante con lo observado anteriormente en los análisis de concentración. Para 0 renovaciones por hora, donde se observa mayor variabilidad, la probabilidad de infección para un tasa de exhalación de 25 quanta·h⁻¹ (media de la distribución) es del 15%, pudiendo variar entre un 5% y un 24% pese a que la zona con mayor densidad comprende probabilidades desde el 10% hasta el 18%.

5 Conclusiones

Se demuestra que el modelo presentado en este artículo es una herramienta eficaz para el análisis y dimensionamiento de una instalación de ventilación mecánica (caudal de renovación necesario) en el actual contexto de pandemia, así como para evaluar el efecto relativo de diferentes medidas de prevención contra el virus (tiempo de exposición, uso de la mascarilla, renovaciones de aire por hora).

Dicho modelo consiste en una ampliación del ya citado en la sección Modelo Analítico. Por un lado, se ha implementado el modelo en Python para obtener una mayor flexibilidad en cuanto a los casos de estudio, así como la posibilidad de hacer un análisis más detallado mediante los gráficos y figuras presentados. Por otro lado, la funcionalidad inicial del modelo de base se ha extendido incorporando la posibilidad de definir eventos por tramos con parámetros variables (emisión de quanta, renovaciones por hora, caudales respiratorios, etc.), para los que se puede computar también la probabilidad acumulada. Adicionalmente, se han modificado las ecuaciones para el “*One Box Model*” de tal forma que se puedan considerar concentraciones iniciales de valor arbitrario.

Los resultados confirman la importancia de una ventilación adecuada y refuerzan los argumentos a favor del uso de sistemas de ventilación mecánica. En concreto, la ventilación mecánica permite obtener caudales de renovación más elevados que la ventilación natural (en la mayoría de los casos), lo que resulta en menor probabilidad de infección. Además, evita la entrada de ruido y contaminantes del exterior, favorece el ahorro energético y permite mayor flexibilidad en cuanto a la ventilación de diferentes espacios. A pesar de que la literatura demuestra que, en condiciones específicas, los caudales de renovación natural, considerada en este artículo como abrir ventanas, pueden oscilar desde valores cercanos a cero hasta una decena de renovaciones por hora, queda también patente que se tiene un control muy limitado sobre dichas condiciones. Por ello, se enfatiza que la ventilación forzada es especialmente apropiada pues permite controlar con exactitud el caudal de renovación y mantenerlo acorde a las necesidades independientemente de factores externos (cantidad, tamaño y ubicación de las aberturas, gradiente térmico interior-exterior, etc.).

Se ha analizado también el impacto de cumplir los requisitos normativos (RITE) en cuanto a las probabilidades de infección. Se comprueba que con los caudales de renovación del aire interior definidos por el RITE se logra reducir hasta más de tres veces la probabilidad de infección respecto al caso con las ventanas abiertas. En el caso de querer reducir más la probabilidad de infección, sería necesario dimensionar las instalaciones con un mayor caudal de renovación del aire interior que el marcado por la norma. Sin embargo, cabe

destacar que el RITE no ha sido concebido en un contexto de pandemia y riesgo de contagio por aerosoles.

En cuanto a la incertidumbre en los resultados obtenidos, se demuestra en el apartado 4.5 la dificultad para cuantificar la tasa de exhalación de quanta y la gran variabilidad que esto conlleva. Sin embargo, el análisis de sensibilidad de los resultados para los casos estudiados permite no solo efectuar análisis de probabilidades de naturaleza relativa si no también absoluta, teniendo siempre en cuenta los límites superior e inferior del intervalo de confianza calculado.

En el caso de las aulas, caso al que se le ha dedicado una importante atención mediática, una ventilación mecánica cumpliendo los caudales establecidos en el RITE consigue eliminar casi por completo la concentración de virus en el aula en el tiempo del recreo (30min) y por completo en la parada de dos horas para comer. Sin embargo, únicamente abriendo ventanas, no se consigue eliminar la concentración de virus presente en el ambiente en ninguno de los dos casos.

6 Bibliografía

- [1] “Organización Mundial de la Salud,” [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news/item/29-06-2020-covidtimeline>. [Accessed 12 2020].
- [2] “Organización Mundial de la Salud,” [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>. [Accessed 12 2020].
- [3] J.L. Jimenez, COVID-19 *transmission patterns only seem explainable by aerosols*, https://docs.google.com/document/d/1Kx4Mka_nORa8LIEwziRYZxOX0J8_ffgnt-9TBjxusc/edit.
- [4] J.L. Jimenez, *FAQs on Protecting Yourself from COVID-19 Aerosol Transmission*, <http://tinyurl.com/faqs-aerosol>, Versión 9/12/2020.
- [5] J.L. Jimenez, *COVID-19 Aerosol Transmission Estimator*, <https://tinyurl.com/covid-estimator>, Versión 28/11/2020.
- [6] R. Zhang, Y. Li, A. L. Zhang, Y. Wang and M. J. Molina, “Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19,” *PNAS*, vol. 117, no. 26, pp. 14857-14863, 2020.
- [7] Liu, Y., Chen, Y., et al, “Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals,” *nature*, vol. 582, pp. 557-560, 2020.
- [8] S. L. Miller, W. W. Nazaroff, J. L. Jimenez, A. Boerstra, G. Buonanno, S. J. Dancer, J. Kurnitski, L. C. Marr, L. Morawska and C. Noakes, “Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event, 2020.
- [9] Yuguo Li, et al., “Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant-full,” *medRxiv*, 2020.
- [10] S. E. Hwang, J. H. Chang and J. Heo, “Possible Aerosol Transmission of COVID-19 Associated with an Outbreak in an Apartment in Seoul, South Korea, 2020,” *International Journal of Infection Diseases*, 2020.
- [11] K. Nissen, K. Janina, D. Akaberi, T. Hoffman, J. Ling, A. Lundkvist, L. Svensson y S. Erik, «Long-distance airborne dispersal of SARS-CoV-2 in COVID-19 wards», *Nature: Scientific Reports* 10, 2020.
- [12] G. Jiang, C. Wang, L. Song, X. Wang, Y. Zhou, C. Fei y H. Liu, «Aerosol transmission, an indispensable route of COVID-19 spread: case study of a department-store cluster», *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, vol. 15, nº 46, 2021.
- [13] “Organización Mundial de la Salud,” [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted>. [Accessed 12 2020].
- [14] G. Buonanno, L. Stabile and L. Morawska, “Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment,” *Environment International*, vol. 141, 2020.
- [15] G. Buonanno, L. Morawska and L. Stabile, “Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications,” *Environment International*, vol. 145, 2020.
- [16] A. Davies, et al., “Testing the efficacy of homemade masks: would they protect in an influenza pandemic?,” *Disaster Med Public Health Preparedness*, vol. 7, no. 4, pp. 413-421, 2013.

- [17] Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE)
- *Versión Consolidada*, Madrid, 2013.
- [18] Comentarios - *Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE)*, Madrid, 2007.
- [19] C. Howard-Reed, L. A. Wallace and W. R. Ott, “The Effect of Opening Windows on Air Change Rates in Two Homes,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 52(2), pp. 147-59, 2002.
- [20] H. Guo, L. Morawska, C. He and D. Gilbert, “Impact of ventilation scenario on air exchange rates and on indoor particle number concentrations in an air-conditioned classroom,” *Atmospheric Environment*, vol. 42, no. 4, pp. 757-768, 2008.
- [21] H. Dai and Z. Bin, “Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces,” *Building Simulations*, vol. 13, pp. 1321-1327, 2020.
- [22] Suit M., et al., “Airborne SARS-CoV-2 Is Rapidly Inactivated by Simulated Sunlight,” *The Journal of Infectious Diseases*, vol. 222, no. 4, pp. 564-571, 2020.
- [23] T. L. Thatcher, A. C. Lai, R. Moreno-Jackson, R. G. Sextro and W. W. Nazaroff, “Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors,” *Atmospheric Environment*, vol. 36, no. 11, pp. 1811-1819, 2002.
- [24] ANSI/ASHRAE, *The Standards for Ventilation and Indoor Air Quality*, ANSI, 2019.

Propiedad intelectual:

Todos los derechos de propiedad intelectual referidos al presente documento pertenecen en exclusiva a Soler & Palau Ventilation Group S.L.U., quedando totalmente prohibida la reproducción total o parcial del mismo en cualquier soporte sin su consentimiento expreso.

