



Shaping Tomorrow's Global
Built Environment Today

Documento de Posicionamiento de ASHRAE sobre **Aerosoles Infecciosos**

Aprobado por el Comité de Dirección (BOD) de ASHRAE el 13 de octubre del 2022

Reafirmado por el "Technology Council" de ASHRAE el 25 de junio del 2025

Caduca el 25 de junio del 2028

Traducido bajo licencia de ASHRAE

ASHRAE es una sociedad profesional global con más de 55.000 miembros, comprometida con servir a la humanidad mediante el avance de las artes y ciencias en materia de calefacción, ventilación, aire acondicionado, refrigeración (HVAC&R) y sus campos afines. Los documentos de posicionamiento de ASHRAE son aprobados por el Comité de Dirección (BOD) y expresan las opiniones de la Sociedad sobre temas específicos. Estos documentos aportan información base objetiva y autorizada a las personas interesadas en temas que estén dentro de la experiencia de ASHRAE, particularmente en áreas donde dicha información sea de utilidad para la elaboración de políticas públicas sólidas. Los documentos también sirven para aclarar la posición de ASHRAE a sus miembros y a profesionales en el sector de la edificación.

Los Aerosoles Infecciosos son una Cuestión de Interés Público

El nivel de riesgo asociado a los patógenos en forma de aerosoles se ha vuelto cada vez más evidente, especialmente durante la crisis del COVID. Estos riesgos son particularmente altos en edificios cerrados.

Funcionarios de salud pública, legisladores, propietarios de edificios, ingenierías y el público en general necesitan directrices precisas y fiables sobre las formas adecuadas de mitigar el riesgo de estos patógenos. Las estrategias disponibles para mitigar riesgos incluyen intervenciones farmacéuticas, controles no específicos de ingeniería y actuaciones de ingeniería. Dada la crisis climática concurrente, el conjunto óptimo de intervenciones de mitigación debe minimizar los riesgos al máximo, generando la menor cantidad posible de emisiones.

¿Por qué ASHRAE se Posiciona sobre los Aerosoles Infecciosos?

Los estándares consensuados de ASHRAE y otras directrices proporcionan la base técnica para las prácticas internacionales de edificación y los códigos energéticos, equilibrando la necesidad de eficiencia energética con la de mantener un ambiente interior saludable y confortable para los ocupantes. El diseño, la instalación, la operación y el mantenimiento de las instalaciones mecánicas de los edificios pueden mejorar o dificultar la capacidad de los edificios para mitigar el riesgo de aerosoles infecciosos.

En consecuencia, las posiciones, estándares y directrices de diseño de ASHRAE pueden ayudar a evitar los riesgos para la salud asociados con aerosoles infecciosos.

ASHRAE mantiene las siguientes posiciones:

- La exposición a aerosoles infecciosos es un factor importante en la transmisión de infecciones en ambientes interiores entre una fuente y un individuo susceptible.

- Las actuaciones de ingeniería que han demostrado reducir el riesgo de exposición a aerosoles infecciosos incluyen la dilución con aire exterior mediante ventilación mecánica o natural, la filtración del aire interior, los patrones de flujo de aire en interiores y la desinfección mediante luz ultravioleta germicida y otras tecnologías que han probado ser eficaces y seguras.
- Las estrategias que utilizan actuaciones de ingeniería para gestionar el riesgo de aerosoles infecciosos deben centrarse en reducir la exposición a estos aerosoles en la zona de respiración.
- Un diseño, instalación, operación y mantenimiento efectivos de los sistemas de ventilación son fundamentales para lograr la mitigación necesaria del riesgo.
- La evidencia existente sobre los efectos de la temperatura y la humedad en el riesgo de infección no justifica, por el momento, cambios en los estándares, regulaciones y directrices de ventilación y calidad del aire interior (CAI).
- La efectividad de cualquier estrategia individual de mitigación de riesgos depende de muchos factores. Usar múltiples estrategias de mitigación de riesgos suele ser más eficaz que depender de una única estrategia.
- Las medidas de mitigación de riesgos deben ser adaptables a los niveles de riesgo en un espacio específico.
- Las combinaciones de actuaciones de ingeniería y otros controles no específicos de ingeniería pueden optimizarse en términos de efectividad, coste y consumo de energía.

ASHRAE recomienda que:

Se establezca un grupo de trabajo multidisciplinario de investigación y desarrollo (I+D), con el objetivo de mejorar la coordinación entre ingenieros, científicos y profesionales de la salud, así como de priorizar y acelerar la agenda de investigación, el proceso de desarrollo y la difusión de resultados. Como mínimo, esta investigación debería incluir los siguientes temas:

- Estudios de intervención controlados para cuantificar el impacto en la transmisión de infecciones derivado de diversas actuaciones de ingeniería, analizados de forma individual y combinados con otros controles no específicos de ingeniería, en relación con aerosoles infecciosos de características variables.
- Metodologías de detección en tiempo real para mejorar el control variable de las instalaciones de climatización en respuesta a diferentes niveles de riesgo.
- Métodos para reducir el coste del ciclo de vida y las emisiones de carbono de las actuaciones de ingeniería en todas las condiciones.
- Estudios para caracterizar la tasa de emisión de aerosoles infecciosos según su tamaño, considerando diferentes patógenos, actividades respiratorias y niveles metabólicos; determinar la relación entre el tamaño y el riesgo de transmisión; y predecir el destino y transporte de estas partículas de aerosol en entornos interiores.
- Herramientas de evaluación cuantitativa del riesgo de infección por aerosoles infecciosos (la evaluación cuantitativa de riesgos microbianos es ampliamente utilizada para el agua y los alimentos, pero mucho menos para los aerosoles).
- Impacto de los patrones de flujo de aire en interiores sobre la transmisión de aerosoles infecciosos y el riesgo de infección resultante.

ASHRAE se compromete a:

- Respaldar los códigos modelo y los estándares que aborden la exposición a aerosoles infecciosos, equilibrando la calidad de la evidencia, la mitigación del riesgo, los costes de instalación, operación y mantenimiento, así como el consumo de energía y las emisiones de

carbono.

- Apoyar códigos modelo y estándares que utilicen volúmenes variables de impulsión de aire exterior/limpio en respuesta a la medición de la calidad del aire, con el objetivo de optimizar la calidad del aire interior de manera eficiente.
- Promover la investigación para mejorar las tecnologías de climatización y el conocimiento necesario para mitigar el riesgo de infección por transmisión aérea.
- Desarrollar protocolos para mejorar las pruebas y la certificación de tecnologías de control.
- Fomentar la publicación de datos de pruebas de filtros que indiquen la eficiencia de eliminación según el tamaño de las partículas para cada filtro como parte del proceso de certificación. Estos datos deben incluir información sobre los efectos en el rendimiento asociados a la carga del filtro y a la carga electrostática (si corresponde).

Anexo A: Antecedentes

Este documento no es una directriz de diseño. Su objetivo es asesorar a los responsables de la formulación de políticas sobre estrategias de actuaciones de ingeniería adecuadas para diversos entornos y distintos estados de enfermedades, tanto en condiciones normales como epidémicas. También considera su combinación con estrategias no específicas de ingeniería, basándose en la mejor ciencia disponible, los beneficios y costes derivados de diversas estrategias, incluidas sus implicaciones de carbono, utilizando principios de medicina basada en evidencia (EBM).

Riesgo de Aerosoles Infecciosos

Las enfermedades respiratorias se encuentran entre las causas más comunes de enfermedades graves y muertes en todo el mundo (Forum of International Respiratory Societies, 2017). Las infecciones respiratorias agudas (IRA) son la principal causa de morbilidad y mortalidad por enfermedades infecciosas a nivel global. Cerca de cuatro millones de personas mueren cada año a causa de IRA, y el 98% de estas muertes son debidas a infecciones del tracto respiratorio inferior (OMS, 2014). La pandemia de COVID-19, causada por el virus SARS-CoV-2, y la creciente tasa de infecciones virales respiratorias emergentes en los últimos años son motivo de gran preocupación, ya que algunos de los patógenos de IRA pueden ser capaces de generar emergencias de salud pública a nivel global.

Los patógenos se clasifican en diferentes grupos de riesgo que describen el peligro relativo que representan los agentes infecciosos o toxinas. Las consideraciones utilizadas en una evaluación de riesgo biológico incluyen la patogenicidad del agente y la dosis infecciosa, el posible resultado de la exposición, la ruta natural de infección, otras rutas de infección derivadas de manipulaciones, la estabilidad del agente en el medio ambiente, la información disponible de estudios en animales y la disponibilidad de profilaxis o intervenciones terapéuticas efectivas (OMS, 2004).

Aunque deben considerarse múltiples factores en la evaluación del riesgo, el diseño de medidas de mitigación de ingeniería y ambientales debe guiarse por la ruta específica de transmisión o diseminación del contaminante. La transmisión de infecciones es un proceso complejo, y el riesgo de enfermedad está determinado por numerosos factores, incluyendo la variabilidad de la respuesta inmune del hospedador (Noakes y Sleight, 2009). La transmisión o diseminación por el aire complica aún más esta incertidumbre, ya que involucre las características del patógeno, la capacidad infecciosa del hospedador, el medio a través del cual el agente infeccioso pasa de la fuente a un nuevo hospedador y la respuesta del proceso de añadir otros factores influyentes (Sze To y Chao, 2010).

Mecanismos de Transmisión de Aerosoles Infecciosos

Un aerosol infeccioso es un conjunto de partículas en el aire cargadas de patógenos. Normalmente, los aerosoles infecciosos son liberados por una persona infectada durante actividades respiratorias como respirar, hablar, cantar, toser y estornudar. Todas las personas, independientemente de si están infectadas o no, liberan gotas de fluidos respiratorios (moco, esputo o saliva) de diversos tamaños durante estas actividades respiratorias.

Algunas de estas gotas son tan grandes que no pueden permanecer suspendidas más de unos pocos segundos en el chorro de aire exhalado. Otras son lo suficientemente pequeñas como para ser consideradas partículas de aerosol (aerosoles), que pueden permanecer suspendidas en el aire durante un período prolongado. Excepto en condiciones de humedad extrema, las gotas más pequeñas se evaporan rápidamente, dejando un residuo sólido o semisólido compuesto por los componentes no

volátiles del fluido respiratorio. Si una persona está infectada, sus gotas respiratorias y aerosoles pueden contener patógenos y ser infecciosos.

Las definiciones tradicionales de transmisión “aérea” y por “gotas” han demostrado ser confusas, y las definiciones revisadas de las rutas de transmisión están más alineadas con los mecanismos reales mediante los cuales los patógenos se transfieren de una persona a otra (Marr y Tang, 2021). Estas rutas revisadas son: (1) inhalación de aerosoles, (2) proyección de gotas grandes y (3) contacto con superficies contaminadas. La primera sustituye la tradicional ruta aérea, que se asumía aplicable solo a largas distancias, mientras que la segunda y la tercera corresponden a las rutas tradicionales de transmisión por gotas y fómites (o contacto). Para facilitar la lectura y comprensión, este comité decidió adoptar la terminología propuesta recientemente.

La inhalación de aerosoles infecciosos puede causar infección, aunque el riesgo de infección de un individuo depende de múltiples factores como la infectividad del organismo en cuestión, su capacidad para permanecer infeccioso en el aire, la susceptibilidad de la persona expuesta, el número de partículas inhaladas, la cantidad de virus infeccioso en las partículas inhaladas, el lugar donde las partículas se depositan en el tracto respiratorio y otros factores.

En el pasado, se pensaba que la transmisión de la mayoría de los patógenos respiratorios estaba asociada principalmente con gotas más grandes, preocupando únicamente a las personas en próximas a una persona infectada. Ahora, está claro que la transmisión de la COVID-19 y otras infecciones respiratorias probablemente esté dominada por la inhalación de aerosoles infecciosos, tanto a corta como a larga distancia (Wang et al., 2021).

Las gotas portadoras de patógenos y las partículas aerosolizadas que caen sobre una superficie pueden ser una fuente de infección a través del contacto y el posterior toque de los ojos o la nariz, o mediante la reaerosolización (o resuspensión), seguida de la inhalación.

Factores que Afectan al Riesgo de Infección Respiratoria

Tanto la duración de la exposición como la proximidad a la fuente—una persona que exhala aerosoles infecciosos—son factores de riesgo. La proximidad a otras personas influye en el riesgo, ya que los patógenos en el aire están más concentrados en los chorros de aire expirados cerca del punto de emisión (Cortellessa et al., 2021). La concentración de aerosoles disminuye con la distancia. A medida que los aerosoles infecciosos se mueven a través de un espacio, pueden perder efectividad con el tiempo. Además, el riesgo de transmisión aumenta con la duración de la exposición (Buonanno et al., 2020).

Desde la perspectiva de posibles intervenciones de mitigación del riesgo, influyen cuatro factores principales en la cadena de infección para los patógenos aerosolizados: fuente, ruta, exposición y vulnerabilidad.

La *fuentes* depende del número de emisores del patógeno, la cantidad de patógeno emitida por cada hospedador infectado y la capacidad de infección del patógeno. En el caso de patógenos aerosolizados, la fuente normalmente es una persona infectada. En algunos casos, puede ser una superficie donde hayan caído partículas y que puedan resuspenderse debido a una perturbación. También puede incluir material fecal y patógenos transmitidos por agua que se aerosolizan, creando otra fuente. Aunque muchos factores influyen en el riesgo de una fuente en particular, el más importante es la capacidad de infección del patógeno (por ejemplo, su transmisibilidad).

Las exhalaciones liberan gotas de diferentes tamaños, incluidas aquellas lo suficientemente pequeñas como para considerarse aerosoles. El número, tamaño y velocidad de estas gotas y aerosoles varía significativamente según la persona, el tipo de actividad respiratoria y/o la intensidad metabólica, el volumen de vocalización y la etapa de la enfermedad si la persona está infectada. Hablar en voz alta, cantar y la respiración profunda asociada con la actividad física aumentan la cantidad y velocidad de las gotas y aerosoles liberados al aire (Coleman et al., 2021; Pöhlker et al., 2021; Tomisa et al., 2021; Wang et al., 2021).

La *ruta* se refiere al movimiento físico del patógeno entre la fuente y el nuevo hospedador, la duración del tiempo que la fuente y el nuevo hospedador permanecen próximos, el medio de transferencia entre la fuente y el hospedador, y las características de dicho medio (en el caso del aire: humedad, temperatura, patrones de flujo de aire en interiores, etc.).

La *exposición* depende de la tasa de inhalación (volumen por unidad de tiempo), que varía según la actividad física (Wang et al., 2021) y la concentración de patógenos en el aire inhalado.

La *vulnerabilidad* se refiere a las defensas que tiene el nuevo hospedador susceptible contra el patógeno que se transmite, incluyendo tanto su respuesta inmune como su comportamiento. A nivel poblacional, la vulnerabilidad está influenciada por el número de posibles nuevos hospedadores en proximidad a una fuente. Por ello, el riesgo es mayor en “centros de transmisión comunitaria.” De manera similar, la vulnerabilidad poblacional es alta en lugares con un gran número de personas más susceptibles a la infección y con un mayor riesgo de desarrollar enfermedades graves en caso de infección (Bueno de Mesquita et al., 2021).

Gestión del Riesgo

El riesgo de propagación de patógenos puede reducirse mediante actuaciones no específicas de ingeniería (es decir, intervenciones farmacéuticas, controles administrativos, etc.) y actuaciones de ingeniería. Es poco probable que el riesgo de exposición a infecciones por diversos patógenos aerosolizados se reduzca a cero. Por lo tanto, el objetivo debe ser seleccionar un conjunto de estrategias, tanto de ingeniería como no relacionadas con ella, que minimicen el riesgo y los desperdicios de la manera más práctica posible.

Dada la variabilidad de los factores que afectan al riesgo de infección en cualquier circunstancia, no existe un conjunto único de estrategias de mitigación que equilibre la evidencia, la efectividad, la oportunidad y el coste frente a todas las posibles combinaciones de factores de riesgo.

En general, los responsables de la formulación de políticas deben considerar dos amplios conjuntos de condiciones operativas: circunstancias “normales”, donde el nivel de riesgo es relativamente regular, y estados epidémicos, donde los niveles de riesgo son temporalmente más altos.

En un estado normal, en gran parte debido a las medidas de salud pública implantadas con el tiempo, experimentamos un riesgo relativamente bajo y similar de transmisión de todas las enfermedades por aerosoles infecciosos en la mayoría de los edificios. Algunos edificios y espacios, como los centros de atención sanitaria, normalmente albergan un mayor número de personas infecciosas e inmunodeprimidas u otras personas vulnerables. Por lo tanto, esos espacios requieren niveles más altos de mitigación del riesgo en circunstancias normales.

En un estado epidémico los riesgos aumentan, generalmente, debido a la presencia de un patógeno particular con una tasa de reproducción especialmente alta y con pocos o ningún control médico

ampliamente disponible. Los riesgos variarán según el nivel de adherencia de la población a diversos protocolos de comportamiento (por ejemplo, cierre de bares y centros comerciales, distanciamiento social, uso de mascarillas, etc.).

Los responsables de la formulación de políticas tienen a su disposición diversas medidas de salud pública para mitigar los riesgos de infección. Estas medidas incluyen controles en la fuente, controles en la ruta de transmisión y controles para proteger a personas vulnerables. Los controles en la fuente incluyen controles administrativos (como limitar el acceso a un espacio o requerir pruebas de detección), controles farmacéuticos (vacunación), equipo de protección individual (EPI), aislamiento/separación, rastreo de contactos para facilitar el aislamiento/separación, y, en algunos casos, limpieza o gestión del agua. Los controles en la ruta de transmisión incluyen tanto actuaciones de ingeniería (ventilación mecánica o natural, filtración, purificación del aire, patrones de flujo de aire en interiores y control de temperatura y humedad) como controles no específicos de ingeniería (luz natural, desinfección de superficies y barreras). Los controles para proteger a personas vulnerables incluyen controles administrativos, controles farmacéuticos, EPIs y aislamiento/separación. Generalmente, la respuesta adecuada a una situación específica será un conjunto de estrategias dentro de estas categorías, que probablemente variarán con el tiempo en respuesta a los niveles cambiantes de riesgo.

Un factor que complica esta gestión es la *velocidad* con la que varía el riesgo, combinada con la *incertidumbre* sobre las características de una enfermedad nueva. El cambio de un estado normal a uno epidémico puede ocurrir tan rápidamente que pueden producirse daños significativos antes de que se implanten los controles. Sin embargo, la evidencia definitiva sobre los modos de transmisión podría no estar disponible durante un largo periodo, y la insistencia en pruebas concluyentes puede causar retrasos significativos en la respuesta. Por ello, existe un argumento sólido para invocar el principio de precaución en estos casos, es decir, “se deben tomar medidas razonables para evitar amenazas que sean serias y plausibles” (Resnik, 2004). Aplicar el principio de precaución implicaría que las actuaciones de ingeniería capaces de hacer frente al peor escenario probable ya estén presentes y listos para su uso cuando se necesiten, o que existan planes para implantar controles efectivos de manera rápida. La importancia del principio de precaución también se extiende a la guía en salud pública, que es esencial para iniciar una respuesta oportuna ante una amenaza seria.

Una consideración importante para los responsables de políticas es la necesidad de establecer controles adecuados para los diferentes niveles de riesgo que cada edificio puede enfrentar. En términos generales, operar constantemente en un estado adaptado a epidemias desperdiciaría recursos. La política óptima será aquella que defina controles apropiados para un estado normal (incluyendo espacios con niveles de riesgo más altos de lo habitual) y que tenga la flexibilidad de intensificarse a la velocidad adecuada en respuesta a una epidemia en desarrollo.

Una dificultad significativa para los responsables de políticas al definir el conjunto óptimo de medidas de mitigación de riesgos es la variabilidad en la respuesta del público a los controles administrativos y el uso de equipo de protección individual (EPI), así como la dificultad de equilibrar las “libertades”. En algunos casos, las personas pueden negarse a mantener el distanciamiento social, vacunarse y/o usar mascarillas. En estas situaciones, la necesidad de actuaciones de ingeniería como medida de respaldo es mucho mayor. Sin embargo, obligar a todos los propietarios de edificios a invertir en extensas actuaciones de ingeniería para permitir la libertad de otros de no usar mascarillas genera un conflicto fundamental de derechos.

Este documento asume una implantación razonable de actuaciones no específicas de ingeniería por

parte de la población en general para mitigar riesgos, y se recomienda a los responsables de políticas que utilicen su influencia para fomentar dicha implantación.

Los responsables de políticas deberán definir niveles aceptables de riesgo y proponer respuestas óptimas de mitigación de riesgos. La respuesta óptima en la gestión del riesgo debe partir de la suposición de un nivel razonable de adopción pública de los comportamientos de salud recomendados. Basándose en los niveles de riesgo anticipados y los recursos disponibles (incluyendo el tiempo de respuesta), la respuesta será un conjunto escalonado de actuaciones de ingeniería y no específicas de ingeniería, priorizadas desde las de menor coste y mayor beneficio/evidencia hasta alcanzar el nivel adecuado de mitigación.

ACTUACIONES DE INGENIERÍA PARA MITIGAR LA TRANSMISIÓN DE AEROSLES

Este documento utiliza el término *actuaciones de ingeniería* para referirse a un conjunto de medidas típicamente asociadas con la “ventilación.” Estas incluyen la impulsión de aire exterior y/o la eliminación de aire contaminado por medios mecánicos o naturales, el control del flujo de aire dentro de un espacio o entre espacios, la purificación del aire (inactivación de aerosoles infecciosos), el control de la temperatura y el control de la humedad. Las actuaciones de ingeniería interrumpen la ruta de transmisión de aerosoles.

La aplicación efectiva de la mayoría de las actuaciones de ingeniería requiere experiencia técnica y profesional en el diseño, instalación, validación, operación y mantenimiento de dichas actuaciones, lo que implica la necesidad de un ecosistema adecuado y recursos financieros para aplicaciones rentables (Shen et al., 2021). Los sistemas que no funcionan correctamente pueden generar una falsa sensación de seguridad, similar al Efecto Peltzman (Iyengar et al., 2021), llevando a los ocupantes a asumir riesgos evitables bajo la suposición de que las actuaciones de ingeniería los protegerán.

Existen actuaciones de ingeniería con una base sólida de evidencia en términos de efectividad y seguridad, así como métodos establecidos de diseño cuantitativo. Entre ellos se incluyen la ventilación, la filtración, ciertas tecnologías de purificación del aire e inactivación de aerosoles y patrones efectivos de flujo de aire en interiores. Otras tecnologías, aunque no cuentan con el mismo nivel de evidencia independiente, también pueden ser aplicables.

Ventilación

La ventilación es el proceso de impulsar aire a un espacio o extraerlo de este mediante medios naturales o mecánicos, con fines como el control de los niveles de contaminantes en el aire. La ventilación puede implicar la impulsión de aire exterior, aire recirculado que ha sido filtrado o tratado de alguna otra manera, o una combinación de ambos. Su función principal es diluir y desplazar el aire contaminado en un espacio, reemplazándolo o mezclándolo con aire menos contaminado o no contaminado. La ventilación está estrechamente relacionada con la distribución del aire en el espacio, ya que los patrones de flujo de aire impactan en la efectividad de la impulsión del aire ventilado y pueden influir en la exposición de los ocupantes.

En numerosos estudios, las tasas de ventilación con aire exterior tratado han mostrado una correlación positiva con la calidad del aire interior, lo que incluye una menor incidencia de síntomas del síndrome del edificio enfermo, menos ausentismo y mejor rendimiento en tareas y aprendizaje (Sundell et al., 2011). Asimismo, mayores tasas de ventilación están asociadas con una menor incidencia de enfermedades transmitidas por el aire. Sin embargo, revisiones sistemáticas de investigaciones sobre la

relación cuantitativa entre el riesgo de infección y las tasas de ventilación han concluido que no existen suficientes datos para especificar tasas mínimas de ventilación para el control de infecciones (Li et al., 2007).

El Estándar ANSI/ASHRAE 62.1 afirma que las tasas de la Tabla del Procedimiento de Tasas de Ventilación (Tabla 6-1 en el Estándar) no están destinadas al control de infecciones: “Los requisitos de esta tabla proporcionan una calidad aceptable del aire interior (CAI). Los requisitos de esta tabla no abordan la transmisión aérea de virus, bacterias u otros contagios infecciosos” (ASHRAE, 2019b).

No obstante, tasas de ventilación basadas en datos empíricos para el control de infecciones se han propuesto e incluso implantado en estándares y códigos en el pasado. A principios del siglo XX, Billings propuso, y la sociedad predecesora de ASHRAE, ASHVE, recomendó tasas de caudal de aire exterior de 14,2 l/s/persona (30 cfm/persona) basadas en consideraciones de prevención de infecciones (Janssen, 1999). Las tasas mínimas actuales de flujo de aire exterior en los estándares suelen ser de aproximadamente 15 cfm/persona (ASHRAE, 2019b). Durante la pandemia de COVID-19, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomendó tasas mínimas de flujo de aire exterior de 10 l/s/persona (21,2 cfm/persona) para instalaciones no sanitarias y 60 l/s/persona (127 cfm/persona) para la mayoría de los espacios en instalaciones sanitarias (OMS, 2021). Lo que parece indiscutible es que las tasas mínimas actuales de ventilación con aire exterior son significativamente más bajas que los niveles recomendados para el control de infecciones. Esto se debe al uso de una definición de calidad del aire interior (CAI) que no aborda la mitigación del riesgo de infección.

En gran parte del mundo, los edificios con ventilación natural, sin instalaciones mecánicas, son comunes. Implantar una estrategia de “empuje-tiro” (con características diseñadas tanto para impulsar aire exterior como para fomentar la eliminación de aire contaminado) en estos edificios puede ayudar a garantizar una impulsión continua de aire exterior con zonas interiores mínimamente estancadas (Gilkeson et al., 2013). Además, esta estrategia puede proporcionar presurización positiva o negativa con respecto al entorno exterior, dependiendo del modo de operación.

Los sistemas de ventilación natural tienen costes iniciales y operativos relativamente bajos si se integran adecuadamente en el diseño del edificio. También tienen una huella de carbono baja. Sin embargo, son difíciles de controlar con precisión, no permiten el control de la temperatura ni de la humedad, y no filtran el aire entrante. Por otro lado, los sistemas de ventilación mecánica tienen costes significativamente más altos, tanto en la instalación inicial como en el mantenimiento y operación continuos. Dependiendo de la combinación de combustibles locales, estos sistemas pueden tener una huella de carbono relativamente alta en términos agregados. Sin embargo, dada la evidencia y la efectividad de los sistemas de ventilación mecánica, la clave para un despliegue exitoso es garantizar la máxima efectividad sin incurrir en costes excesivos ni aumentar las emisiones de carbono al ventilar más de lo necesario para reducir el riesgo de transmisión.

Filtración

La filtración elimina partículas del aire dentro de un espacio o del aire que es recirculado por componentes centralizados o distribuidos de instalaciones de climatización. Los filtros utilizados en aplicaciones de climatización suelen ser filtros mecánicos hechos de fibras que capturan las partículas más grandes principalmente por intercepción e impacto, y las partículas más finas principalmente por difusión. Los filtros se clasifican según diversos sistemas, como la escala de Valor Mínimo de Eficiencia Informada (MERV, por sus siglas en inglés) definida en el Estándar ANSI/ASHRAE 52.2 (2017). La escala MERV va de 1 a 16, donde números mayores indican una mayor eficiencia. El rendimiento de los filtros

se evalúa en tres rangos de tamaño: 0,3 a 1 μm (E1), 1 a 3 μm (E2), y 3 a 10 μm (E3). El Estándar ASHRAE 62.1 generalmente requiere filtros en instalaciones de climatización con al menos MERV 8, que no tiene una eficiencia mínima especificada en el rango E1, 20% en el rango E2, y 70% en el rango E3. Dada la distribución del tamaño de los aerosoles respiratorios, los filtros MERV 8 tienen baja efectividad para reducir la exposición a aerosoles infecciosos. La directriz de ASHRAE para el COVID-19 recomienda mejorar los filtros a MERV 13 si es posible. Los filtros MERV 13 tienen requisitos mínimos de eficiencia de 50%, 85% y 90% en los rangos 1, 2 y 3, respectivamente. En aplicaciones críticas, como en el ámbito sanitario, se pueden utilizar filtros MERV más altos e incluso filtros de aire particulado de alta eficiencia (HEPA), que han sido probados para tener una eficiencia del 99,97% o superior para partículas de 0,3 μm . Es importante entender que, aunque las clasificaciones de los filtros generalmente se basan en partículas de 0,3 μm o mayores, en realidad pueden capturar partículas mucho más pequeñas.

Dado que la filtración es un mecanismo diseñado para permitir la recirculación de aire ya calentado o enfriado, puede implantarse para mitigar el riesgo de aerosoles infecciosos evitando un gran aumento en el consumo de energía para calefacción o refrigeración. Un filtro genera resistencia al movimiento del aire, por lo que mover aire a través de un filtro requiere un mayor consumo de energía para los ventiladores en comparación con el aire no filtrado. Sin embargo, dado que la filtración y recirculación de aire evita la necesidad de calentar o enfriar aire nuevo, ofrece una forma de mitigar el riesgo con un coste operativo menor en comparación con simplemente tomar aire exterior y tratarlo antes de su uso. El beneficio relativo de la filtración varía según el clima y las condiciones meteorológicas estacionales, ya que la energía necesaria para calefacción y refrigeración fluctúa.

Se ha demostrado que la filtración elimina eficazmente partículas que podrían ser infecciosas (Bueno de Mesquita et al., 2021). Además, a medida que la red eléctrica se vuelve cada vez más renovable, la huella de carbono de esta medida se reducirá, así como la necesidad de energía inicial para calefacción o refrigeración, que generalmente proviene de la combustión in situ y tiene una huella de carbono más alta.

La filtración puede realizarse en los conductos de un sistema o en un local mediante un sistema de recirculación. La evidencia sobre la efectividad de la filtración para el aire recirculado es relativamente alta (Bueno de Mesquita et al., 2021). Como ocurre con otras intervenciones de ventilación, la cuestión con la filtración no es si funciona, sino cuánto se necesita para lograr el impacto deseado. Liu et al. (2022) realizaron una revisión científica sistemática y concluyeron que hay suficiente evidencia científica para afirmar que los purificadores de aire en el espacio (IAC, por sus siglas en inglés) pueden eliminar el SARS-CoV-2 en el aire. Más allá de la efectividad de un IAC para eliminar aerosoles cargados de virus, el tamaño y la cantidad de unidades deben elegirse en función del volumen del espacio que están limpiando. Al igual que otros sistemas de filtración, los IAC están asociados con un aumento en el consumo de energía.

Otras Tecnologías de Purificación del Aire

Además de la ventilación y la filtración, existen otras tecnologías que inactivan microorganismos en el aire o aumentan la tasa de eliminación de aerosoles infecciosos mediante efectos electrostáticos. Estas incluyen la desinfección germicida ultravioleta (GUV), también conocida como irradiación germicida ultravioleta (UVGI), y varios "purificadores de aire electrónicos" que generan diferentes especies reactivas, como iones, radicales hidroxilo y peróxidos, entre otros. Excepto por GUV, que ha sido ampliamente estudiada y aplicada durante casi un siglo (Kowalski, 2010) y está aprobada por los

Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE. UU. (CDC) como control para la tuberculosis en entornos sanitarios (Jensen et al., 2005; Whalen, 2009), la mayoría de estas tecnologías no están bien caracterizadas debido a una combinación de calidad de la evidencia y, en algunos casos, preocupaciones sobre la producción de subproductos. El estado actual de las tecnologías de purificación del aire se revisa en el Documento de Posición de ASHRAE sobre Filtración y Purificación del Aire (ASHRAE, 2021).

El principal subproducto de preocupación para los purificadores de aire electrónicos es el ozono, que puede producirse mediante descargas de corona y ciertas longitudes de onda de la luz ultravioleta (UV). Una de las posiciones del Documento de Posición de ASHRAE sobre Filtración y Purificación del Aire aborda la producción de ozono. Señala que no deben utilizarse purificadores de aire basados en ozono y que debe tenerse extrema precaución si los purificadores de aire producen ozono como subproducto. Esta preocupación y posición se reflejan además en el Estándar ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2019b), que exige que todos los purificadores de aire electrónicos cumplan con el estándar UL 2998, que limita la concentración de ozono en las emisiones de un purificador de aire a un máximo de cinco ppb (UL, 2020). Tanto las fuentes germicidas UV como algunos tipos de purificadores de aire con especies reactivas han recibido esta certificación. Sin embargo, el ozono no es el único subproducto de preocupación. Investigaciones recientes han informado la producción de diversos contaminantes químicos y aerosoles cuando se utilizan purificadores de aire con especies reactivas (Joo et al., 2021; Ye et al., 2021). Las propias especies reactivas (por ejemplo: iones, peróxido de hidrógeno, etc.) también pueden ser potencialmente peligrosas (Collins et al., 2021). Determinar si la cantidad de estos subproductos representa un riesgo significativo requiere más estudios y actualmente es uno de los factores que abogan por la precaución en la aplicación de purificadores de aire que generan subproductos.

La luz en la banda UV-C inactiva microorganismos al afectar componentes genómicos y estructurales. La susceptibilidad de cientos de microorganismos se ha determinado experimentalmente (Kowalski, 2010). La longitud de onda germicida más comúnmente utilizada es UV-C de 254 nm, producida por lámparas de vapor de mercurio o de amalgama. Debido a que esta longitud de onda puede causar irritación ocular y cutánea a corto plazo, e incluso daños graves y duraderos en los ojos, se aplica de manera que se evite o minimice la exposición de los ocupantes de los edificios. Los sistemas germicidas ultravioleta pueden aplicarse de diversas maneras. La implantación más antigua de GUV para desinfectar el aire es el sistema de "zona superior", en el que dispositivos montados en la pared o colgantes crean una zona de desinfección por encima de la zona ocupada. Estos sistemas se utilizaron por primera vez en la década de 1930 y demostraron ser muy efectivos contra el sarampión y otras enfermedades infantiles en escuelas (Wells et al., 1942). La luz ultravioleta germicida también es efectiva para la desinfección de corrientes de aire en sistemas HVAC y purificadores de aire cerrados (ASHRAE, 2019a). Los sistemas de desinfección de corrientes de aire instalados en unidades de tratamiento de aire pueden prevenir simultáneamente el crecimiento microbiano en serpentines de enfriamiento, lo que resulta en una reducción de los costes de mantenimiento y del uso de energía (Bahnfleth, 2017). GUV también se ha utilizado para desinfectar superficies en espacios desocupados y controlar patógenos asociados a infecciones relacionadas con la atención sanitaria (HAI) en instalaciones de salud (Weber et al., 2016; Wong et al., 2016).

Las tecnologías emergentes de fuentes germicidas UV (LEDs y lámparas excimer) tienen el potencial de habilitar nuevas aplicaciones de GUV. En particular, la "UV-C lejana" en longitudes de onda más cortas dentro del rango UV-C (aproximadamente de 200 nm a 230 nm) ha demostrado tanto una buena efectividad germicida como el potencial de ser segura para la exposición de los ocupantes. Esto

permitiría la irradiación total de espacios ocupados para desinfectar simultáneamente el aire y las superficies, proporcionando protección contra la transmisión tanto aérea como por fómites (Buonanno et al., 2020).

Patrones de Flujo de Aire en Interiores

Los patrones de flujo de aire en interiores pueden influir en la trayectoria de los aerosoles desde la fuente. La zona de respiración de los ocupantes es el espacio más crítico donde la concentración y el movimiento de los aerosoles pueden afectar directamente el riesgo de infección. La efectividad de la ventilación en los espacios interiores depende de varios factores relacionados con el diseño y la operación de las instalaciones de climatización, los cuales pueden impactar los patrones de flujo de aire en los espacios interiores. Idealmente, el aire limpio impulsado debería barrer los contaminantes de la zona de respiración sin recirculación significativa ni estancamientos que formen bolsas de alta concentración. El aire limpio no debería salir del espacio sin recoger contaminantes de la zona de respiración. Los patrones de flujo de aire en interiores, la trayectoria resultante de los contaminantes en el aire y el riesgo de infección pueden depender de varios factores, incluyendo el número, la ubicación y el tipo de difusores de suministro en el espacio; las tasas de caudal de aire de impulsión, las tasas de cambio de aire y los alcances asociados de los difusores; la temperatura del aire impulsado; el número, tamaño y ubicaciones de las rejillas de retorno/extracción; la ubicación e intensidad de diversas fuentes de calor en un espacio; la disposición de los muebles y otros obstáculos al flujo de aire; la ubicación, el tipo y la capacidad de los purificadores de aire en un espacio y, de manera importante, las posiciones relativas de las fuentes de contaminantes en el espacio. La selección estratégica y la disposición de los difusores de suministro de aire y las rejillas de extracción pueden formar zonas de contención aerodinámica en los patrones de flujo de aire interiores que pueden ayudar a reducir el riesgo de exposición a contaminantes en los espacios interiores (Khankari 2021).

Las pruebas físicas y las mediciones en tiempo real de todos los parámetros que afectan el rendimiento de la ventilación en espacios cerrados suelen ser intensivas en tiempo y mano de obra, si no imposibles. En tales situaciones, los análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) ofrecen una alternativa viable para obtener una visión integral del rendimiento de la ventilación. Si se realizan adecuadamente y con la experiencia necesaria, los análisis CFD pueden ayudar a los diseñadores a comprender patrones complejos de flujo de aire en interiores y la trayectoria de los aerosoles. Los conocimientos obtenidos durante las etapas iniciales del diseño y los procesos de renovación pueden mejorar el rendimiento de la ventilación y reducir el riesgo de infección en los espacios interiores (Khankari, 2016, 2021).

Los patrones efectivos de flujo de aire en interiores (Bolashikov y Melikov, 2009; Khankari, 2021) son un factor clave que impulsa la dilución y no se limitan únicamente a la cantidad de aire suministrado al espacio. Ningún estudio ha proporcionado datos suficientes para cuantificar la cantidad de ventilación necesaria para lograr una mitigación efectiva del riesgo (Bueno de Mesquita et al., 2021; Li et al., 2007). La razón subyacente clave es la falta de datos relacionados con la intensidad de la fuente infecciosa y la respuesta a la dosis para estimar el nivel necesario de dilución (Li et al., 2007; Pantelic y Tham, 2012).

Durante la pandemia de COVID-19, ha habido una mayor concienciación sobre la calidad del aire interior (CAI) en los microambientes, lo que ha llevado a la exploración de sistemas de ventilación innovadores y estrategias de flujo de aire en interiores. Los sistemas de ventilación personalizada que impulsan aire 100% exterior, filtrado o desinfectado con UV, directamente a la zona de respiración del ocupante podrían ofrecer protección contra la exposición al aire contaminado y mitigar el riesgo de

transmisión de aerosoles infecciosos (Bolashikov et al., 2009; Cermak et al., 2006; Danca et al., 2022; Ghaddar y Ghali, 2022; Licina et al., 2015a, 2015b; Pantelic et al., 2009, 2015). Cuando se combinan con dispositivos de extracción localizados o personalizados, los sistemas de ventilación personalizada mejoran aún más la capacidad general de mitigar la exposición en las zonas de respiración, como se ha observado en estudios experimentales y de CFD en entornos de atención sanitaria (Bivolarova et al., 2016; Bolashikov et al., 2015; Yang et al., 2013, 2014a, 2014b, 2015). No existen estudios epidemiológicos conocidos que demuestren claramente una reducción en la transmisión de enfermedades infecciosas atribuida a los patrones de flujo de aire en interiores.

La evidencia de la efectividad del control de los patrones de flujo de aire en interiores para mitigar el riesgo de aerosoles infecciosos es moderada (Bueno de Mesquita et al., 2021).

El control de los patrones de flujo de aire en interiores implica poco coste adicional o impacto de carbono más allá de las estrategias básicas de ventilación, pero puede requerir un diseño más detallado y costes asociados.

Control de Humedad y Temperatura

La investigación sugiere que la persistencia de varios patógenos infecciosos en aerosoles puede verse afectada por las condiciones ambientales, incluidas la temperatura y la humedad (Tang, 2009). Diferentes patógenos responden de manera distinta a las variaciones en las condiciones de temperatura y humedad. Por lo tanto, intentar modificar el riesgo a través de estos mecanismos resulta problemático. Bahnfleth y Degraw encontraron que “existe evidencia de que el tiempo de supervivencia del virus SARS-CoV-2 es mayor a bajas temperaturas y baja humedad, pero no está claro que la manipulación de la temperatura o la humedad como medidas de mitigación de riesgos tenga un impacto significativo en comparación con otras actuaciones” (Bahnfleth y Degraw, 2021).

La humidificación implica costes significativos tanto en la instalación como en la operación y genera una huella de carbono y consumo energético considerables. Además, puede ocasionar otros problemas microbiológicos (por ejemplo, crecimiento de moho) en el entorno construido.

Ventilación Controlada por Demanda

Los requisitos de ventilación suelen basarse en el número máximo de ocupantes y la superficie de suelo de un espacio o en su volumen. Estas son estimaciones estáticas del caudal necesario y no siempre se ajustan a medida que cambia la ocupación. El uso de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) como indicador del caudal de ventilación por ocupante se utiliza comúnmente para modular el caudal de aire de ventilación (Bhagat et al., 2020; Franco y Schito, 2020; Zivelonghi y Lai, 2021). Sin embargo, este enfoque presenta desafíos, ya que las mediciones de CO₂ no siempre representan la demanda real en un espacio determinado, especialmente con sistemas VAV de tipo recirculación de múltiples zonas. Además, es importante señalar que la concentración de CO₂ no se ve afectada por la filtración ni por la mayoría de los demás métodos de purificación del aire, por lo que no debe usarse como un indicador directo del riesgo de infección. ASHRAE ha desarrollado un documento de posicionamiento separado y directrices que abordan el uso del CO₂ para el control de la calidad del aire interior, incluido el riesgo de infección por vía aérea (ASHRAE, 2022).

Las nuevas tecnologías de sensores permiten la medición directa de material particulado fino en el aire (PM_{2.5}), que puede incluir aerosoles infecciosos (Kaliszewski et al., 2020). La creciente disponibilidad y la disminución de los costes de los sensores de material particulado (PM) sugieren que su uso para el

control de ventilación puede ser viable. Se han reportado sensores de bajo coste para la calidad del aire interior (CAI) para la monitorización continua (Zhang et al., 2021) y sistemas de alerta temprana para infecciones por COVID-19 (Peladarinos et al., 2021). Aunque los sensores no pueden diferenciar entre aerosoles infecciosos y otros tipos de material particulado, la concentración de partículas finas es una medida importante de la calidad del aire que puede usarse para modular el caudal de ventilación o controlar los sistemas de purificación del aire. Se necesita investigación adicional y desarrollo de protocolos de aplicación, incluidos protocolos para validar el rendimiento.

CONTROLES NO ESPECÍFICOS DE INGENIERÍA PARA LA TRANSMISIÓN DE AEROSOL

Los controles no específicos de ingeniería generalmente se enfocan en reducir la fuente y proteger a los nuevos hospedadores vulnerables.

Controles Farmacéuticos

Los controles farmacéuticos incluyen la vacunación, otras formas de profilaxis, tratamientos y otras estrategias. En general, estas estrategias buscan reducir la fuente (por ejemplo, el número de personas infectadas o la cantidad de patógenos aerosolizados) y proteger al nuevo hospedador vulnerable. Estas estrategias, por lo general, no afectan la trayectoria de transmisión.

Dos características de los controles farmacéuticos los hacen problemáticos en ciertos aspectos. Primero, para ser efectivos, los controles farmacéuticos dependen de la adhesión del público y de un acceso adecuado. La experiencia muestra que ninguno de estos factores es perfecto y, por sí solos, los controles farmacéuticos pueden ser insuficientes para la tarea. Segundo, especialmente en el contexto de una epidemia, donde la velocidad del cambio en el riesgo es alta, estos controles pueden no ser adecuados para la necesidad de mitigación del riesgo.

Por lo tanto, al igual que con otras medidas de control no relacionadas con la ingeniería, los controles farmacéuticos son vitalmente importantes, pero pueden ser insuficientes por sí solos.

Eliminación del Peligro

La eliminación del peligro implica la separación de las fuentes de infección de la población no infectada. Ejemplos de este tipo de intervenciones incluyen órdenes de permanecer en casa para evitar el contacto entre personas y minimizar el riesgo de transmisión, o el cierre de edificios o espacios para algunas o todas las personas. Otros ejemplos de estrategias de eliminación incluyen el distanciamiento social (es decir, separar la fuente de infección a una distancia calculada para mitigar el riesgo de transmisión) y barreras entre personas en un espacio. En el caso de las gotas, pero no de los aerosoles, las barreras entre personas en un espacio pueden mitigar el riesgo de transmisión (Wang et al., 2021).

Las estrategias de eliminación del peligro dependen en gran medida del cumplimiento por parte de la población; por lo tanto, se basan fuertemente en la adhesión voluntaria. Durante períodos normales, los niveles de amenaza son lo suficientemente bajos como para que la falta de cumplimiento y adhesión no sea un problema significativo. Sin embargo, la variación en el cumplimiento durante epidemias y en lugares de alto riesgo puede ser altamente problemática y requerirá que los líderes políticos actúen de manera responsable y efectiva.

La experiencia reciente con el COVID-19 demuestra de manera dramática la variación potencial en la adopción de estas medidas y los resultados consiguientes para las poblaciones locales, regionales,

nacionales e internacionales.

Las órdenes de permanecer en casa podrían considerarse intervenciones de bajo coste y bajo consumo de energía. Sin embargo, también tienen serias implicaciones económicas para ciertos segmentos de la población trabajadora, así como para la economía en general. Algunos trabajadores, considerados esenciales, deben continuar trabajando durante períodos de mayor riesgo, lo que genera profundas inequidades en términos de exposición al riesgo. Estos factores se acumulan a medida que su aplicación se prolonga en el tiempo.

Controles Administrativos

Los controles administrativos se implantan por las entidades que controlan el acceso y el uso de espacios específicos. Estas estrategias incluyen el cierre de edificios o espacios, la limitación del número de personas y la duración de la ocupación en edificios o espacios, así como la implantación de requisitos de vacunación, pruebas y uso de EPI.

La estrategia de cerrar completamente edificios o espacios, por definición, elimina el riesgo dentro de ellos. Los costes directos y los impactos de energía/huella de carbono son relativamente bajos. Sin embargo, los costes para una entidad económica, las personas que deben obtener sus ingresos por trabajar allí, las personas a las que se les niegan los servicios derivados de las actividades en el edificio, y el coste para la economía en general, pueden ser enormes.

Un enfoque más matizado es usar controles administrativos para limitar el número y la distancia entre las personas en un edificio o espacio, incluyendo la limitación del tiempo que una o más personas pueden permanecer en un espacio. La eficacia de esta estrategia variará en función de las tasas de reproducción del patógeno y los detalles y la efectividad de la implantación. Sin embargo, esta estrategia puede mitigar los costes de la estrategia de cierre del edificio, al tiempo que captura muchos de los beneficios e impone costes adicionales a la entidad que implanta los controles administrativos.

Una tercera clase de controles administrativos se centra en los comportamientos personales de los ocupantes del edificio. Es decir, la entidad que controla el acceso a un edificio o espacio puede requerir prueba de vacunación, pruebas o el uso de EPI como condición previa para que una persona entre en un espacio. Esta estrategia utiliza la alta eficacia de las estrategias individuales junto con un control administrativo para hacer cumplir ciertos niveles de mitigación del riesgo. En general, este tipo de estrategia tiene un coste más alto que los controles administrativos centrados estrictamente en el número de personas, pero con mayor eficacia. Los propietarios de edificios deben tener en cuenta las leyes jurisdiccionales que regulan la divulgación de información personal de salud al requerir pruebas de vacunación o testeo.

Limpieza

La limpieza puede proporcionar un beneficio cuando los patógenos aerosolizados o en gotas se depositan en superficies donde tienen una vida lo suficientemente larga como para entrar en contacto, ya sea físico o por resuspensión en el aire, con una persona no infectada. Una limpieza exhaustiva, en sus diversas formas, puede mitigar en gran medida este riesgo donde se produce. Sin embargo, la evidencia sobre los beneficios de la limpieza para reducir la transmisión de patógenos aerosolizados es débil (Bueno de Mesquita et al., 2021).

Uso de Mascarillas y EPI

El uso de mascarillas puede contener un patógeno si el usuario está infectado o proteger contra un patógeno a las personas no infectadas. La evidencia muestra que esta estrategia puede ser altamente efectiva y tiene costes e impactos de carbono muy bajos (Wang et al., 2021).

Barreras

El uso de barreras plásticas dentro de un espacio puede proporcionar cierta mitigación contra la proyección de gotas a corta distancia, pero solo si se realizan modificaciones correspondientes en los sistemas de ventilación (Capron et al., 2022). En algunos casos, las barreras plásticas dentro de los espacios aumentan el riesgo (Bueno de Mesquita, 2021). La altura de las barreras tiene un mayor impacto que su ancho. La evidencia sobre la efectividad de las barreras es baja, pero los costes generales y los energéticos, en particular, también son bajos.

Anexo B: Análisis de la Taxonomía de la Fortaleza de las Recomendaciones

Introducción

Este anexo busca conectar el mundo de la medicina basada en evidencia (EBM, por sus siglas en inglés) con la necesidad de utilizar la evidencia disponible para formular recomendaciones en el ámbito práctico de la aplicación de sistemas de ventilación. Históricamente, el estudio de la efectividad de las actuaciones de ingeniería para mitigar el riesgo de infección no ha recibido las inversiones necesarias en investigación para alcanzar los niveles exigidos por los rigurosos estándares de la EBM. Sin embargo, es necesario tomar decisiones basadas en la mejor evidencia disponible. Unir estos dos mundos aporta un nivel de transparencia y rigor a la necesidad práctica de proporcionar orientación a los responsables de políticas, al mismo tiempo que representa un llamado a realizar más investigaciones para disponer de mejores datos en el futuro.

Los responsables de políticas enfrentan innumerables desafíos al determinar cómo asignar incentivos y sanciones para guiar al público hacia resultados que equilibren mejor los riesgos y beneficios. La ciencia de la ventilación sigue siendo imprecisa en cuanto a la especificación de tasas mínimas necesarias para controlar la transmisión de aerosoles infecciosos. Por lo tanto, los responsables de políticas necesitan disponer de la información más rigurosa y transparente para tomar las decisiones necesarias. También deben priorizar la investigación para determinar mejor la efectividad de las diversas estrategias, lo que permitirá formular mejores prescripciones en el futuro. La metodología utilizada en este ejercicio da un paso importante hacia el abordaje de esta necesidad.

Dado que estamos tratando con intervenciones dirigidas a resultados de salud—usando la ventilación como una intervención para reducir el riesgo de infección—hemos decidido desarrollar una versión de una herramienta comúnmente utilizada en la EBM.

La esencia de la EBM es proporcionar orientación a los profesionales y responsables de políticas mediante la integración de la mejor evidencia de investigación con la experiencia clínica y los valores de los pacientes (Sackett et al., 2000), así como con el entorno y las circunstancias en las que se están llevando a cabo las intervenciones de salud (Guyatt et al., 2015). Una metodología central en la EBM es el uso de la Taxonomía de la Fortaleza de las Recomendaciones (SORT, por sus siglas en inglés). En general, las metodologías SORT tratan de evaluar la evidencia que respalda el uso de una intervención

particular, equilibrándola con aspectos no deseables de la intervención, como efectos secundarios (Guyatt et al., 2015).

La traducción directa de las metodologías de la EBM a la ciencia de la ventilación es difícil debido al tipo de evidencia generalmente disponible para tomar decisiones sobre ventilación. Este esfuerzo utiliza un SORT adecuado para proporcionar tanto rigor como transparencia, de maneras que deberían elevar la credibilidad de las recomendaciones.

Medición de la Calidad de la Evidencia

El SORT comienza con una evaluación de la evidencia disponible. En este caso, la calidad de la evidencia se evaluó utilizando la metodología descrita a continuación. Se desarrolló una pregunta de búsqueda para cada intervención, comparando los resultados con y sin la medida de ingeniería específica, es decir, en áreas con transmisión de patógenos en el aire (población), ¿cuál es el efecto de la purificación del aire (UVGI) (intervención) en la transmisión de patógenos respiratorios (resultado) en comparación con entornos sin tecnología UVGI (control)? Con el PICO desarrollado (Población, Intervención, Control, Resultado), se realizó una búsqueda bibliográfica en las bases de datos digitales JSTOR, PubMed y ScienceDirect.

Solo se incluyeron revisiones sistemáticas que abordaran la intervención específica y los patógenos respiratorios. Finalmente, se incluyeron únicamente los siguientes seis artículos:

- Dandnayak, D., L. Zhong, and L. Hartling. 2021. The impact of heating, ventilation, and air conditioning design features on the transmission of viruses, including the 2019 novel coronavirus: A systematic review of ultraviolet radiation. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2021.10.12.21264904v1.full.pdf>
- Liu, D.T., K.M. Philips, M.M. Speth, G. Besser, C.A. Mueller, and A.R. Sedaghat. 2021. Portable HEPA Purifiers to Eliminate Airborne SARS-CoV-2: A Systematic Review. *Otolaryngology—Head and Neck Surgery* 166(4). <https://doi.org/10.1177/01945998211022636>
- NCCEH. 2021. A rapid review of the use of physical barriers in non-clinical settings and COVID-19 transmission. Vancouver, BC, Canada: National Collaborating Center for Environmental Health. <https://ncceh.ca/documents/evidence-review/rapid-review-use-physical-barriers-non-clinical-settings-and-covid-19>
- Talic, S., S. Shah, H. Wild., D. Gasevic, A. Maharaj, Z. Ademi, X. Li, W. Xu, I. Mesa-Eguiagaray, J. Rostron, E. Theodoratou, X. Zhang, A. Motee, D. Liew, and D. Ilic. 2021. Effectiveness of public health measures in reducing the incidence of covid-19, SARS-CoV-2 transmission, and covid-19 mortality: systematic review and meta-analysis. *BMJ* 2021:375. <https://doi.org/10.1136/BMJ-2021-068302>
- Thornton, G.M., B.A. Fleck, E. Kroeker, D. Dandnayak, N. Fleck, L. Zhong, and L. Hartling. 2021. The impact of heating, ventilation, and air conditioning design features on the transmission of viruses, including the 2019 novel coronavirus: a systematic review of ventilation and coronavirus. *MedRxiv* 2021.10.08.21264765. <https://doi.org/10.1101/2021.10.08.21264765>
- WHO. 2019. Non-pharmaceutical public health measures for mitigating the risk and impact of epidemic and pandemic influenza. Geneva: World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/non-pharmaceutical-public-health-measuresfor-mitigating-the-risk-and-impact-of-epidemic-and-pandemic-influenza>

Si bien la calidad de la evidencia desde la estricta perspectiva de la medicina basada en evidencia (EBM) es baja, otra clase de estudios, propiamente clasificados como *experimentos naturales*, ha ganado

atención en áreas donde los ensayos controlados son difíciles (DiNardo 2008, 2010). De hecho, el Premio Nobel de Economía 2021 fue otorgado a pioneros en el uso de experimentos naturales. En cierto sentido, los tipos de estudios generalmente disponibles en relación con el valor de la ventilación para mitigar riesgos, ejemplificados de manera contundente por el trabajo del Grupo de Trabajo sobre Epidemias de ASHRAE durante la crisis del COVID, encajan perfectamente en este dominio. Y, aunque los mundos de la ciencia y la ley puedan tener una relación complicada, diversos estándares legales para la toma de decisiones utilizan una preponderancia de este tipo de evidencia frente a la incertidumbre, el tipo de incertidumbre que inevitablemente enfrentan los responsables de políticas. Para llegar a sus conclusiones, los expertos cuidadosamente reunidos para este Documento de Posición deben confiar en gran medida en tales experimentos naturales, junto con las leyes fundamentales e inviolables de la física combinadas con una comprensión de la exposición y la dosis para fundamentar sus juicios. Por lo tanto, hemos expresado la evidencia disponible desde la estricta perspectiva de la EBM y la evidencia indirecta desde la perspectiva de los experimentos naturales y la ciencia fundamental que actualmente tenemos a nuestra disposición.

Evaluación de los Beneficios, Costes e Impactos Energéticos/de Carbono de una Intervención

Un concepto clave del SORT es el equilibrio entre "las consecuencias deseables e indeseables de las estrategias alternativas de gestión, basándose en las mejores estimaciones de esas consecuencias" (Guyatt et al., 2008). En nuestro caso, los beneficios son imposibles de cuantificar. Es decir, dada la amplia gama de patógenos con diferentes niveles de virulencia y infectividad, junto con la incierta adopción de otras intervenciones no relacionadas con la ventilación, el problema de delimitar estrategias de ventilación (por ejemplo, ¿cuánto mejor son cuatro renovaciones de aire por hora en comparación con dos?), y la dificultad de predecir la frecuencia de ocurrencia, hacen que sea imposible expresar los beneficios con precisión. Por lo tanto, dependemos de una estimación de efectividad basada en el consenso multidisciplinario de expertos utilizando la Técnica Delphi (Yousuf, 2007).

La Técnica Delphi obtiene el consenso dentro de un panel de expertos a través de una serie de cuestionarios que se retroalimentan al panel después de cada ronda. Fue el método más adecuado para este comité porque:

- La Técnica Delphi recopila opiniones sin necesidad de reunir físicamente a los panelistas, lo cual es especialmente problemático con un grupo de expertos geográficamente dispersos.
- Los cuestionarios se completan de forma independiente y confidencial, evitando la dominancia de individuos particulares y permitiendo a los participantes expresar sus ideas sin preocuparse por ser asociados con dichas ideas. Esto no podría lograrse mediante discusiones en grupos focales.
- El proceso de retroalimentación anima a los participantes a considerar elementos planteados por otros que ellos mismos podrían haber pasado por alto y les permite cambiar su opinión durante el proceso (Couper, 1984). También presenta la opinión colectiva del grupo de una manera no conflictiva (Hasson et al., 2000). Este tipo de mecanismo de retroalimentación está ausente en las entrevistas directas (Smithson, 2000).

La técnica incluye tres pasos básicos.

El primer cuestionario enviado al panel de expertos (en este caso, los miembros de este comité) solicita una lista de opiniones basadas en experiencias y juicios, y una lista de predicciones. En la segunda ronda, se envía a cada experto una copia de la lista colectiva, y se les pide que califiquen cada elemento

según el criterio de importancia proporcionado en el cuestionario. El tercer cuestionario incluye la lista, las calificaciones indicadas y el consenso. Se pide a los expertos que revisen sus opiniones o discutan sus razones para no alcanzar un consenso con el grupo.

El coste de cada elemento se evaluó como un "promedio" del coste del ciclo de vida, que incluye tanto los costes iniciales como los costes continuos. Estos costes son una especie de promedio agregado y no reflejan necesariamente los costes relativos en una ubicación específica. Cabe señalar que esta estimación es relativa, ya que distingue entre costes absolutos y no costes en el contexto de los recursos disponibles. Por ejemplo, una estrategia podría considerarse de bajo coste en un entorno relativamente acomodado, pero de alto coste en un entorno con recursos limitados. No obstante, en cualquiera de los casos, tendrá un coste más bajo que otras alternativas, por lo que la señalamos como una estrategia de bajo coste.

La segunda dimensión del coste es el del consumo de energía y las emisiones de carbono resultantes. Reconociendo la ciencia y la urgencia de abordar el cambio climático, junto con la gran influencia del entorno construido en este problema crítico, ASHRAE ha creado recientemente un centro de excelencia para estudiar formas de descarbonizar los edificios (CEBD). De acuerdo con la ciencia y la dirección del CEBD, proporcionamos estimaciones relativas del potencial de emisiones a lo largo del ciclo de vida de las estrategias consideradas. Obviamente, la urgencia de una epidemia puede superar los impactos mucho más difusos y a largo plazo del cambio climático asociados con una estrategia particular. Sin embargo, también reconocemos que la implantación masiva de una estrategia particular con mayor potencial de calentamiento global (PCG) creará una fuente permanente de emisiones. Por lo tanto, al comparar dos estrategias potenciales, cada una con evidencia y beneficios similares, deberíamos preferir la solución con un PCG más bajo.

Recomendaciones

El paso final en un SORT es alcanzar una recomendación basada en la solidez de la evidencia y el equilibrio entre los aspectos deseables e indeseables de una intervención particular.

Algunas versiones de SORT utilizan algoritmos para derivar la fortaleza de la recomendación a partir del beneficio, coste y la solidez de la evidencia. En nuestra evaluación, debido a la relativa falta de investigación concluyente, nuevamente utilizamos la Técnica Delphi para determinar de la mejor manera posible el consenso de nuestro comité de expertos. La tabla resultante expresa nuestro mejor intento de clasificar las medidas recomendadas para la mitigación del riesgo en función de la mejor evidencia que pudimos recopilar. Este ejercicio indica la necesidad de una investigación multidisciplinaria y en profundidad que involucre estas técnicas y un gran grupo de expertos en la materia de una amplia variedad de disciplinas.

Resumen de Estrategias

La evidencia actual sobre la asociación entre la tasa de ventilación y la infección aérea es débil en términos de diseño de estudio. Sin embargo, existe evidencia indirecta sólida que muestra que el aumento de la ventilación y las estrategias relacionadas discutidas en este documento están asociadas con una reducción del riesgo de infección aérea (Li et al., 2007). La ventilación mitiga el riesgo, pero los requisitos mínimos de ventilación necesarios para mitigar el riesgo de aerosoles infecciosos requieren más investigación.

Reconocemos que, desde la estricta perspectiva de la medicina basada en evidencia rigurosa, la

evidencia disponible tiene baja calidad debido al conjunto específico de métodos y procedimientos utilizados para recopilar y analizar datos en estudios ecológicos y retrospectivos. Las limitaciones éticas, los múltiples factores involucrados en los mecanismos de transmisión aérea y la especificidad de la dinámica de ventilación en interiores exigen una metodología innovadora para producir evidencia sólida que informe a los organismos reguladores del entorno construido y a las instituciones de salud pública.

Estrategia	Calidad de la evidencia (desde la perspectiva de la MBE)	Evidencia indirecta	Magnitud del beneficio	Coste del ciclo de vida	Energía y carbono	Grado de recomendación
Distanciamiento físico	Moderado	Alto *	Moderado	Bajo	Bajo	Recomendación fuerte
Barreras entre ocupantes	Bajo	Bajo *	Bajo	Moderado	Bajo	Recomendación condicional
Limpieza de superficies y objetos	Bajo	Moderado *	Bajo	Bajo	Bajo	Recomendación condicional
Mascarilla	Moderado	Alto *	Alto	Bajo	Bajo	Recomendación fuerte
Ventilación de tamaño adecuado —natural	Bajo	Alto **	Moderado	Bajo	Bajo	Recomendación fuerte
Ventilación de tamaño adecuado —mecánica	Bajo	Alto **	Alto	Alto	Alto	Recomendación fuerte
Filtración (requiere ventilación mecánica)	Moderado	Alto **	Moderado	Moderado	Alto	Recomendación
Purificación de aire (UVGI)	Moderado	Alto **	Moderado	Alto	Moderado	Recomendación condicional
Purificación de aire (otros métodos)	No aplica	Bajo **	Bajo	Alto	Moderate	Recomendación débil
Patrones de flujo de aire interior	Moderado	Alto **	Alto	Moderado	Bajo	Recomendación
Control de humedad (requiere ventilación mecánica)	No aplica	Bajo **	Bajo	Alto	Alto	Recomendación débil

* Capron et al. 2022

** de Mesquita et al. 2022

REFERENCIAS

- ASHRAE. 2017. ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017, *Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size*. Peachtree Corners, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. 2019a. Chapter 62, "Ultraviolet Air and Surface Treatment." In *ASHRAE Handbook—2019 HVAC Applications*. Peachtree Corners, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. 2019b. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Peachtree Corners, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. 2021. *ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning*. Peachtree Corners, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. 2022. *ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide*. Peachtree Corners, GA: ASHRAE.
- Bahnfleth, W., and J. Degraw. 2021. Reducing Airborne Infectious Aerosol Exposure. *ASHRAE Journal* 63(5): 18–21.
- Bahnfleth, W.P. 2017. Cooling coil ultraviolet germicidal irradiation. *ASHRAE Journal* 59(10):72–74.
- Bhagat, R. K., M.S. Davies Wykes, S.B. Dalziel, and P.F. Linden. 2020. Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. *Journal of Fluid Mechanics* 903 F1. Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.720>.
- Bivolarova, M.P., A.K. Melikov, C. Mizutani, K. Kajiwara, and Z.D. Bolashikov. 2016. Bed-integrated local exhaust ventilation system combined with local air cleaning for improved IAQ in hospital patient rooms. *Building and Environment* 100:10–18. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.006>.
- Bolashikov, Z.D., M. Barova, and A. Melikov. 2015. Wearable personal exhaust ventilation (WPEV): Improved indoor air quality and reduced exposure to air exhaled from a sick doctor. *Science and Technology for the Built Environment* 21(8): 1117–125. <https://doi.org/10.1080/23744731.2015.1091270>.
- Bolashikov, Z.D., and A.K. Melikov. 2009. Methods for air cleaning and protection of building occupants from airborne pathogens. *Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC 2007), Sendai, Japan, October 28-31, 2007*, 44(7), 1378–1385. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.001>.
- Bueno de Mesquita, P.J., W.W. Delp, W.R. Chan, W.P. Bahnfleth, and B.C. Singer. 2021. Control of airborne infectious disease in buildings: Evidence and research priorities. *Indoor Air* 32(1). <https://doi.org/10.1111/ina.12965>.
- Buonanno, G., L. Morawska, and L. Stabile. 2020. Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications. *Environment International* 145:106112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112>.
- Buonanno, M., D. Welch, I. Shuryak, and D.J. Brenner. 2020. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. *Scientific Reports* 10(1):10285. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67211-2>.
- Capron, A., P. Garc, and E. Schenk. 2022. *Public Health Lessons for Non-Vaccine Influenza Interventions: Looking Past COVID-19*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26283>.
- Cermak, R., A.K. Melikov, L. Forejt, and O. Kovar. 2006. Performance of Personalized Ventilation in Conjunction with Mixing and Displacement Ventilation. *HVAC&R Research* 12(2): 295–311. <https://doi.org/10.1080/10789669.2006.10391180>.
- Coleman, K. K., D.J.W. Tay, K.S. Tan, S.W.X. Ong, T.S. Than, M.H. Koh, Y.Q. Chin, H. Nasir, T.M. Mak, J.J.H. Chu, Milton, D. K., Chow, V. T. K., Tambyah, P. A., Chen, M., & Tham, K. W. (2021). Viral Load of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in Respiratory Aerosols Emitted by Patients With Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) While Breathing, Talking, and Singing. *Clinical Infectious Diseases* 74(10):1722–1728. <https://doi.org/10.1093/cid/ciab691>.
- Collins, Douglas B., and Farmer, Delphine K., (2021). Unintended Consequences of Air Cleaning Chemistry. *Environmental Science & Technology* 55(18):12172-12179.
- Cortellessa, G., Stabile, L., Arpino, F., Faleiros, D. E., van den Bos, W., Morawska, L., & Buonanno, G. (2021).

- Close proximity risk assessment for SARS-CoV-2 infection. *The Science of the Total Environment* 794: 148749–148749. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148749>.
- Couper, M. 1984. The Delphi technique: Characteristics and sequence model. *ANS Adv Nurs Sci* 7(1), 72–77. <https://doi.org/10.1097/00012272-198410000-00008>.
- Danca, P., C.I. Coşoiu, I. Nastase, F. Bode, and M.R. Georgescu. 2022. Personalized Ventilation as a Possible Strategy for Reducing Airborne Infectious Disease Transmission on Commercial Aircraft. *Applied Sciences* 12(4). <https://doi.org/10.3390/app12042088>.
- Dinardo, J. 2010. Natural Experiments and Quasi-Natural Experiments. In S. N. Durlauf & L. E. Blume (Eds.), *Microeconometrics*: 139–153. Palgrave Macmillan UK. https://doi.org/10.1057/9780230280816_18.
- Forum of International Respiratory Societies. 2017. *The Global Impact of Respiratory Disease—Third Edition*. European Respiratory Society. https://www.firsnet.org/images/publications/FIRS_Master_09202021.pdf
- Franco, A., and E. Schito, E. 2020. Definition of Optimal Ventilation Rates for Balancing Comfort and Energy Use in Indoor Spaces Using CO₂ Concentration Data. *Buildings* 10(8). <https://doi.org/10.3390/buildings10080135>.
- Ghaddar, N., and K. Ghali. 2022. Ten questions concerning the paradox of minimizing airborne transmission of infectious aerosols in densely occupied spaces via sustainable ventilation and other strategies in hot and humid climates. *Building and Environment* 214:108901. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108901>.
- Gilkeson, C.A., M.A. Camargo-Valero, L.E. Pickin, and C.J. Noakes. 2013. Measurement of ventilation and airborne infection risk in large naturally ventilated hospital wards. *Building and Environment* 65(July 2013):35–48. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.006>
- Guyatt, G., A.D. Oxman, R. Kunz, Y. Falck-Ytter, G.E. Vist, A. Liberati, and H.J. Schünemann. 2008. Going from evidence to recommendations. *BMJ* 336(7652):1049. <https://doi.org/10.1136/bmj.39493.646875.AE>.
- Guyatt, G., D. Rennie, M. Meade, and D. Cook. 2015. *Users' guides to the medical literature: A manual for evidence-based clinical practice, Third Edition*. New York: McGraw Hill.
- Hasson, F., S. Keeney, and H. McKenna. 2000. Research guidelines for the Delphi survey technique. *Journal of Advanced Nursing* 32(4): 1008–1015.
- Iyengar, K.P., P. Ish, R. Botchu, V.K. Jain, and R. Vaishya. 2021. Influence of the Peltzman effect on the recurrent COVID-19 waves in Europe. *Postgraduate Medical Journal* 98:e110–e111. <https://doi.org/10.1136/postgradmedj-2021-140234>.
- Janssen, J.E. 1999. The history of ventilation and temperature control: The first century of air conditioning. *ASHRAE Journal* 41(10): 48–52.
- Jensen, P.A., L.A. Lambert, M.F. Iademarco, and R. Ridzon. 2005. Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings. *MMWR. Recommendations and Reports: Morbidity and Mortality Weekly Report. Recommendations and Reports / Centers for Disease Control*. 2005; 54(RR-17):1-141., 54(17). <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/6659>.
- Joo, T., J.C. Rivera-Rios, D. Alvarado-Velez, S. Westgate, and N.L. Ng. 2021. Formation of Oxidized Gases and Secondary Organic Aerosol from a Commercial Oxidant-Generating Electronic Air Cleaner. *Environmental Science & Technology Letters* 8(8):691–98. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00416>.
- Kaliszewski, M., M. Włodarski, J. Młyńczak, and K. Koczyński. 2020. Comparison of Low-Cost Particulate Matter Sensors for Indoor Air Monitoring during COVID-19 Lockdown. *Sensors* 20(24). <https://doi.org/10.3390/s20247290>.
- Khankari, K. 2016. Patient room HVAC. *ASHRAE Journal* 58(6):16–26.
- Khankari, K. 2021. Analysis of spread of airborne contaminants and risk of infection. *ASHRAE Journal* 63(7):14–20.
- Kowalski, W. 2010. *Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection*. Berlin: Springer Science and Business Media.

- Li, Y., G.M. Leung, J. Tang, X. Yang, C. Chao, J.Z. Lin, J. Lu, P.V. Nielsen, J. Niu, and H. Qian. 2007. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment—a multidisciplinary systematic review. *Indoor Air* 17(1):2–18.
- Licina, D., A. Melikov, C. Sekhar, and K.W. Tham. 2015a. Human convective boundary layer and its interaction with room ventilation flow. *Indoor Air* 25(1):21–35. <https://doi.org/10.1111/ina.12120>.
- Licina, D., A. Melikov, J. Pantelic, C. Sekhar, and K.W. Tham. 2015b. Human convection flow in spaces with and without ventilation: Personal exposure to floor-released particles and cough-released droplets. *Indoor Air* 25(6), 672–682. <https://doi.org/10.1111/ina.12177>.
- Liu, D.T., K.M. Phillips, M.M. Speth, G. Besser, C.A. Mueller, and A.R. Sedaghat. 2022. Portable HEPA Purifiers to Eliminate Airborne SARS-CoV-2: A Systematic Review. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery* 166(4):615–622. <https://doi.org/10.1177/01945998211022636>.
- Noakes, C.J., and P.A. Sleight. 2009. Mathematical models for assessing the role of airflow on the risk of airborne infection in hospital wards. *Journal of the Royal Society Interface* 6(suppl_6):S791–S800.
- Pantelic, J., G.N. Sze-To, K.W. Tham, C.Y. Chao, and Y.C.M. Khoo. 2009. Personalized ventilation as a control measure for airborne transmissible disease spread. *Journal of the Royal Society Interface* 6(suppl_6):S715–S726.
- Pantelic, J., and K.W. Tham. 2012. Assessment of the mixing air delivery system ability to protect occupants from the airborne infectious disease transmission using Wells–Riley approach. *HVAC&R Research* 18(4):562–574. <https://doi.org/10.1080/10789669.2012.647230>.
- Pantelic, J., K.W. Tham, and D. Licina. 2015. Effectiveness of a personalized ventilation system in reducing personal exposure against directly released simulated cough droplets. *Indoor Air* 25(6):683–693. <https://doi.org/10.1111/ina.12187>.
- Peladarinos, N., V. Cheimaras, D. Piromalis, K.G. Arvanitis, P. Papageorgas, N. Monios, I. Dogas, M. Stojmenovic, and G. Tsaramirsis. 2021. Early Warning Systems for COVID-19 Infections Based on LowCost Indoor Air-Quality Sensors and LPWANs. *Sensors* 21(18). <https://doi.org/10.3390/s21186183>.
- Pöhlker, M.L., O.O. Krüger, J.-D. Förster, T. Berkemeier, W. Elbert, J. Fröhlich-Nowoisky, U. Pöschl, C. Pöhlker, G. Bagheri, and E. Bodenschatz. 2021. Respiratory aerosols and droplets in the transmission of infectious diseases. *ArXiv Preprint ArXiv:2103.01188*.
- Shen, J., M. Kong, B. Dong, M.J. Birnkrant, and J. Zhang. 2021. Airborne transmission of SARS-CoV-2 in indoor environments: A comprehensive review. *Science and Technology for the Built Environment* 27(10):1331–1367. <https://doi.org/10.1080/23744731.2021.1977693>.
- Smithson, J. 2000. Using and analysing focus groups: Limitations and possibilities. *International Journal of Social Research Methodology* 3(2):103–119. <https://doi.org/10.1080/136455700405172>.
- Sundell, J., H. Levin, W.W. Nazaroff, W.S. Cain, W.J. Fisk, D.T. Grimsrud, F. Gyntelberg, Y. Li, A.K. Persily, A.C. Pickering, J.M. Samet, J.D. Spengler, S.T. Taylor, and C.J. Weschler. 2011. Ventilation rates and health: Multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor Air* 21(3):191–204. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00703.x>.
- Sze To, G.N., and C.Y.H. Chao. 2010. Review and comparison between the Wells-Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases. *Indoor Air* 20(1):2–16. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00621.x>.
- Tang, J.W. 2009. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents. *Journal of the Royal Society Interface* 6(suppl_6):S737–S746.
- Tomisa, G., A. Horváth, Á. Farkas, A. Nagy, E. Kis, and L. Tamási. 2021. Real-life measurement of sizefractionated aerosol concentration in a plethysmography box during the COVID-19 pandemic and estimation of the associated viral load. *Journal of Hospital Infection* 118:7–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2021.08.025>.
- UL. 2020. UL 2998, *Environmental Claim Validation Procedure (ECVP) for Zero Ozone Emissions from Air Cleaners, Third Edition*. Northbrook, IL: Underwriters Laboratories, Inc.
- Wang, C.C., K.A. Prather, J. Sznitman, J.L. Jimenez, S.S. Lakdawala, Z. Tufekci, and L.C. Marr. 2021. Airborne transmission of respiratory viruses. *Science* 373(6558). <https://doi.org/10.1126/science.abd9149>.

- Weber, D. J., W.A. Rutala, D.J. Anderson, L.F. Chen, E.E. Sickbert-Bennett, and J.M. Boyce. 2016. Effectiveness of ultraviolet devices and hydrogen peroxide systems for terminal room decontamination: Focus on clinical trials. *Disinfection, Sterilization and Antisepsis: Principles, Practices, Current Issues, New Research and New Technologies* 44(5, Supplement):e77–e84. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2015.11.015>.
- Wells, W., M. Wells, and T. Wilder. 1942. The environmental control of epidemic contagion. I. *An Epidemiologic Study of Radiant Disinfection of Air in Day Schools* *Am J Hyg* 35:97–121.
- Whalen, J. J. 2009. *Environmental control for tuberculosis; basic upper-room ultraviolet germicidal irradiation guidelines for healthcare settings guide*. <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/5306>.
- Wong, T., T. Woznow, M. Petrie, E. Murzello, A. Muniak, A. Kadora, and E. Bryce. 2016. Postdischarge decontamination of MRSA, VRE, and Clostridium difficile isolation rooms using 2 commercially available automated ultraviolet-C-emitting devices. *American Journal of Infection Control* 44(4):416–420. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2015.10.016>
- Woods, J., N. James, E. Kozubal, E. Bonnema, K. Brief, L. Voeller, and J. Rivest. 2022. Humidity's impact on greenhouse gas emissions from air conditioning. *Joule* 6(4):726–741. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.013>.
- WHO. 2004. *Laboratory Biosafety Manual, Third Ed*. Geneva: World Health Organization.
- WHO. 2014. *Infection prevention and control of epidemic-and pandemic-prone acute respiratory infections in health care*. Geneva: World Health Organization.
- WHO. 2021. *Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19*. Geneva: World Health Organization.
- Yang, J., C. Sekhar, D. Cheong, and B. Raphael. 2014a. Performance evaluation of an integrated Personalized Ventilation—Personalized Exhaust system in conjunction with two background ventilation systems. *Building and Environment* 78:103–110. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.015>.
- Yang, J., C. Sekhar, D.K.W. Cheong, and B. Raphael. 2014b. Performance Evaluation of a Novel Personalized Ventilation – Personalized Exhaust System for Airborne Infection Control. *Indoor Air* 25 (2):176–187. <https://doi.org/10.1111/ina.12127>.
- Yang, J., C. Sekhar, D.K.W. Cheong, and B. Raphael. 2015. A time-based analysis of the personalized exhaust system for airborne infection control in healthcare settings. *Science and Technology for the Built Environment* 21(2):172–178. <https://doi.org/10.1080/10789669.2014.976511>.
- Yang, J., C. Sekhar, D.C.K. Wai, and B. Raphael. 2013. Computational fluid dynamics study and evaluation of different personalized exhaust devices. *HVAC&R Research* 19(8):934–946. <https://doi.org/10.1080/10789669.2013.826066>.
- Yang, W., and L.C. Marr. 2011. Dynamics of Airborne Influenza A Viruses Indoors and Dependence on Humidity. *PLOS ONE* 6(6): e21481. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021481>.
- Ye, Q., J.E. Krechmer, J.D. Shutter, V.P. Barber, Y. Li, E. Helstrom, L.J. Franco, J.L. Cox, A.I.H. Hrdina, M.B. Goss, N. Tahsini, M. Canagaratna, F.N. Keutsch, and J.H. Kroll. 2021. Real-Time Laboratory Measurements of VOC Emissions, Removal Rates, and Byproduct Formation from Consumer-Grade Oxidation-Based Air Cleaners. *Environmental Science & Technology Letters* 8(12):1020–1025. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00773>.
- Yousuf, M. I. 2007. Using expert opinions through Delphi technique. *Practical Assessment, Research, and Evaluation* 12(1): Article 4.
- Zhang, H., R. Srinivasan, and V. Ganesan. 2021. Low Cost, Multi-Pollutant Sensing System Using Raspberry Pi for Indoor Air Quality Monitoring. *Sustainability* 13(1). <https://doi.org/10.3390/su13010370>.
- Zivelonghi, A., and M. Lai. 2021. Mitigating aerosol infection risk in school buildings: The role of natural ventilation, volume, occupancy and CO₂ monitoring. *Building and Environment* 204:108139. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108139>.

MIEMBROS DEL COMITÉ DE DESARROLLO DEL DOCUMENTO

El Documento de Posicionamiento de ASHRAE sobre Aerosoles Infecciosos fue desarrollado por el "Society's Position Document Revision Committee" con Walt Vernon como Presidente.

William P. Bahnfleth, PhD, PE
Pennsylvania State University
State College, Pennsylvania, United States

Kishor Khankari, PhD, FASHRAE
Ansiht LLC
Ann Arbor, MI, United States

Linsey Marr, PhD
Virginia Tech
Blacksburg, Virginia, United States

Chandra Sekhar, PhD, FASHRAE
National University of Singapore
Singapore

Walt Vernon, PE, MBA, JD, LLM
Mazzetti
San Francisco, California, United States

Luca Fontana
World Health Organization
Geneva, Switzerland

Yuguo Li, PhD
The University of Hong Kong
Hong Kong, China

Jovan Pantelic, PhD
Well Living Laboratory
Rochester, MN

Wayne Thomann, PhD
Duke University
Durham, North Carolina, United States

Cognizant Committee

El Presidente del "Environmental Health Committee" también actuó como miembro exoficio.

Luke Leung
Environmental Health Committee, Chair Skidmore
Owings & Merrill
Clarendon Hills, IL

HISTORIA DEL DOCUMENTO

Historial de Publicación y Revisión

Lo siguiente resume las fechas de revisión, reafirmación o retirada:

6/24/2009—El BOD aprueba el Documento de Posicionamiento titulado “Airborne Infectious Diseases”

1/25/2012—El “Technology Council” aprueba la reafirmación del Documento de Posicionamiento titulado “Airborne Infectious Diseases”

1/19/2014—El BOD aprueba la revisión del Documento de Posicionamiento titulado “Airborne Infectious Diseases”

1/31/2017—El “Technology Council” aprueba la reafirmación del Documento de Posicionamiento titulado “Airborne Infectious Diseases”

2/5/2020—El “Technology Council” aprueba la reafirmación del Documento de Posicionamiento titulado “Airborne Infectious Diseases”

4/14/2020—El BOD aprueba la revisión del Documento de Posicionamiento titulado “Infectious Aerosols”

10/13/2022—El BOD aprueba la revisión del Documento de Posicionamiento titulado “Infectious Aerosols”

6/25/2025—El “Technology Council” aprueba la reafirmación del Documento de Posicionamiento titulado “Infectious Aerosols”

Esta publicación fue traducida con permiso en 2025 a partir de la edición en inglés titulada *ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols*, publicada por ASHRAE © 2022. Traducción realizada por Andrés Sepúlveda del ASHRAE Spain Chapter. ASHRAE no asume ninguna responsabilidad por la exactitud de la traducción. Para adquirir la edición en inglés, póngase en contacto con ASHRAE, 180 Technology Parkway, Peachtree Corners, GA 30092 USA, www.ashrae.org.

This publication was translated with permission in 2025 from the English edition titled *ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols*, published by ASHRAE © 2022. Translation by Andrés Sepúlveda of the ASHRAE Spain Chapter. ASHRAE assumes no responsibility for the accuracy of the translation. To purchase the English-language edition, contact ASHRAE, 180 Technology Parkway, Peachtree Corners, GA 30092 USA, www.ashrae.org.