

PURIFICADORES DE AIRE

Un Resumen Técnico

3^{ra} Edición

Purificadores de Aire Portátiles

Filtros para Sistema de
Calefacción y de HVAC

PREFACIO

Este documento fue desarrollado por la Oficina de Radiación y Aire Interior, División de Ambientes interiores, de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (EPA). Se enfoca en purificadores de aire de uso residencial; no trata los purificadores de aire que se usan en estructuras mayores o comerciales como edificaciones para oficinas, escuelas, edificios habitacionales de apartamentos, o edificios públicos. Se pretende que sea útil particularmente a diseñadores profesionales de casas residenciales, oficiales a cargo de la salud pública, y a profesionales de calidad de aire interior. Puede servir como referencia a cualquiera que diseñe, edifique, opere, inspeccione, mantenga o que de cualquier manera trabaje con edificaciones, equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) y/o purificadores/purificadores de aire portátiles. Incluyendo a profesionales de servicio a domicilio, constructores y arquitectos.

Además de proveer información general acerca de los diferentes tipos de contaminantes que son controlados por purificadores de aire, este documento trata los tipos de dispositivos de purificación de aire y tecnologías disponibles, los métodos de medición que pueden usarse para comparar dispositivos de purificación de aire, la eficacia de los dispositivos de purificación de aire para eliminar contaminantes de aire interior e información de ensayos clínicos controlados sobre los efectos que los purificadores de aire pueden tener en la salud y en indicadores de salud.

Una publicación más breve que acompaña este reporte, diseñada para el público en general, **Guía de purificadores de aire en el hogar**, también está disponible en la página web de la EPA en www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/guide-air-cleaners-home.

RECONOCIMIENTOS

La Oficina de Radiación y Aire Interior, División de Ambientes interiores, de la EPA agradece a todos los profesionistas que contribuyeron al desarrollo de este documento, incluyendo a Terry Brennan de Camroden Associates, Lew Harriman de Mason-Grant Consulting, Brent Stephens del Illinois Institute of Technology, a Vito Ilacqua de la Oficina de Investigaciones y Desarrollo del Centro Nacional de Investigación del Medio Ambiente de la EPA y a Alberto Herrera por la traducción de este documento.

Número de Establecimiento de la EPA: La ley federal de pesticidas requiere a los fabricantes de generadores de ozono que listen un número de establecimiento de la EPA en el empaquetado del producto. Este número solo identifica las instalaciones en donde se fabricó el producto. Su presencia no implica que la EPA respalde el producto, ni tampoco implica que la EPA haya encontrado que producto sea seguro y efectivo.

Los generadores de ozono que se venden como purificadores de aire producen gas ozono. Ninguna agencia federal de gobierno ha aprobado estos dispositivos para su uso en espacios habitables. Para más información sobre generadores de ozono que se venden como purificadores de aire, véase [la página web] www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/ozone-generators-are-sold-air-cleaners.

Etiquetas ENERGY STAR®: Algunos purificadores de aire portátiles que se venden en el Mercado son cualificados como ENERGY STAR®. Por favor nótese la siguiente aclaración en su empaquetado: “Este producto se ha ganado la etiqueta ENERGY STAR® cumpliendo con estrictos lineamientos establecidos por la agencia EPA de los Estados Unidos. La EPA no respalda ninguna declaración del fabricante de un aire interior más sano por el uso de este producto”.

Descargo de responsabilidades: La EPA no certifica ni recomienda marcas específicas de purificadores de aire o dispositivos de purificación de aire incluyendo purificadores o purificadores de aire portátiles.

TABLE OF CONTENTS

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | 5 |
| Resumen de la investigación | 8 |
| Purificadores de aire y calidad del aire interior | 8 |
| Purificadores de aire y la salud | 8 |
| Los purificadores de aire deben ser operados para ser efectivos..... | 8 |
| Los purificadores de aire y el ruido | 9 |
| Filtros para sistemas de calefacción y eliminación de material particulado fino | 9 |
| Filtros del sistema de calefacción y operación del sistema de HVAC | 9 |
| Emisiones de subproductos de algunas tecnologías usadas en purificadores de aire | 10 |
| Selección y uso de purificadores de aire portátiles e instalados en ductos..... | 11 |
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| CONTAMINANTES DEL AIRE INTERIOR | 14 |
| TRES ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LOS CONTAMINANTES DEL AIRE INTERIOR | 16 |
| TIPOS DE PURIFICADORES DE AIRE | 17 |
| COMPRIENDIENDO LA EFICIENCIA FRENTE A LA EFICACIA | 18 |
| TIPOS DE TECNOLOGÍAS DE LIMPIEZA DEL AIRE | 19 |
| Tecnologías de limpieza del aire utilizadas para eliminar partículas..... | 19 |
| Purificadores de aire con medios de material fibroso | 23 |
| <i>Métricas de prueba para filtros de aire con medios de materia fibroso</i> | 23 |
| Filtros de aire de partículas de alta eficiencia (HEPA) | 24 |
| <i>Tipos de filtros de aire con medios de material fibroso</i> | 24 |
| <i>Consideraciones prácticas para el uso de filtros de aire de medios de material fibroso</i> | 26 |
| Precipitadores electrostáticos (ESP) e ionizadores | 29 |
| <i>Posibles efectos negativos de la carga de partículas</i> | 30 |
| <i>Precauciones con respecto a la producción de ozono por ESP y ionizadores</i> | 30 |

| | |
|---|-----------|
| Purificadores de aire por irradiación germicida ultravioleta (UVGI)..... | 31 |
| <i>La tecnología UVGI</i> | 31 |
| <i>Tipos de limpiadores UVGI y su eficacia</i> | 31 |
| <i>Desventajas de los limpiadores UVGI</i> | 33 |
| Tecnologías de limpieza del aire utilizadas para eliminar gases | 34 |
| Medios absorbentes | 34 |
| La oxidación fotocatalítica (PCO) | 35 |
| Plasma..... | 37 |
| Generadores de ozono | 37 |
| Consideraciones prácticas sobre el uso de purificadores de aire para eliminar gases | 38 |
| Eliminación del radón y su progenie | 39 |
| SELECCIÓN Y USO DE UN LIMPIADOR DE AIRE PORTÁTIL | 39 |
| Capacidad de purificación del aire (CADR) para filtros de aire portátiles | 39 |
| Ruido de purificadores de aire portátiles | 43 |
| Consideraciones prácticas para el uso de filtros de aire portátiles | 43 |
| SELECCIONAR Y UTILIZAR UN FILTRO DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN U OTRO PURIFICADOR DE AIRE INSTALADO EN DUCTOS | 45 |
| Consideraciones prácticas para el uso de purificadores de aire instalados en ductos | 45 |
| APROXIMACIONES DE LOS COSTOS DE ELECTRICIDAD OPERATIVOS DE LOS PURIFICADORES DE AIRE PORTÁTILES E INSTALADOS EN DUCTOS | 47 |
| ¿LA LIMPIEZA DE AIRE SERÁ CAPAZ DE REDUCIR LOS EFECTOS EN LA SALUD DE LOS CONTAMINANTES DEL AIRE INTERIOR? | 48 |
| Evidencia del impacto de los filtros de aire en las concentraciones de contaminantes en interiores | 49 |
| Evidencia de los impactos de los purificadores de aire en los resultados de salud y/o biomarcadores de resultados de salud | 50 |
| Resumen de los impactos en los resultados de salud de la alergia y el asma | 50 |
| Resumen de los impactos en los resultados de salud cardiovascular | 50 |
| Resumen de los ensayos clínicos controlados de salud y sus limitaciones | 51 |
| Descripciones detalladas de los ensayos clínicos controlados en la salud | 58 |
| MAS INVESTIGACIÓN ES NECESARIA | 66 |
| OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN | 67 |
| ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS | 68 |
| GLOSARIO | 69 |
| REFERENCIAS | 72 |

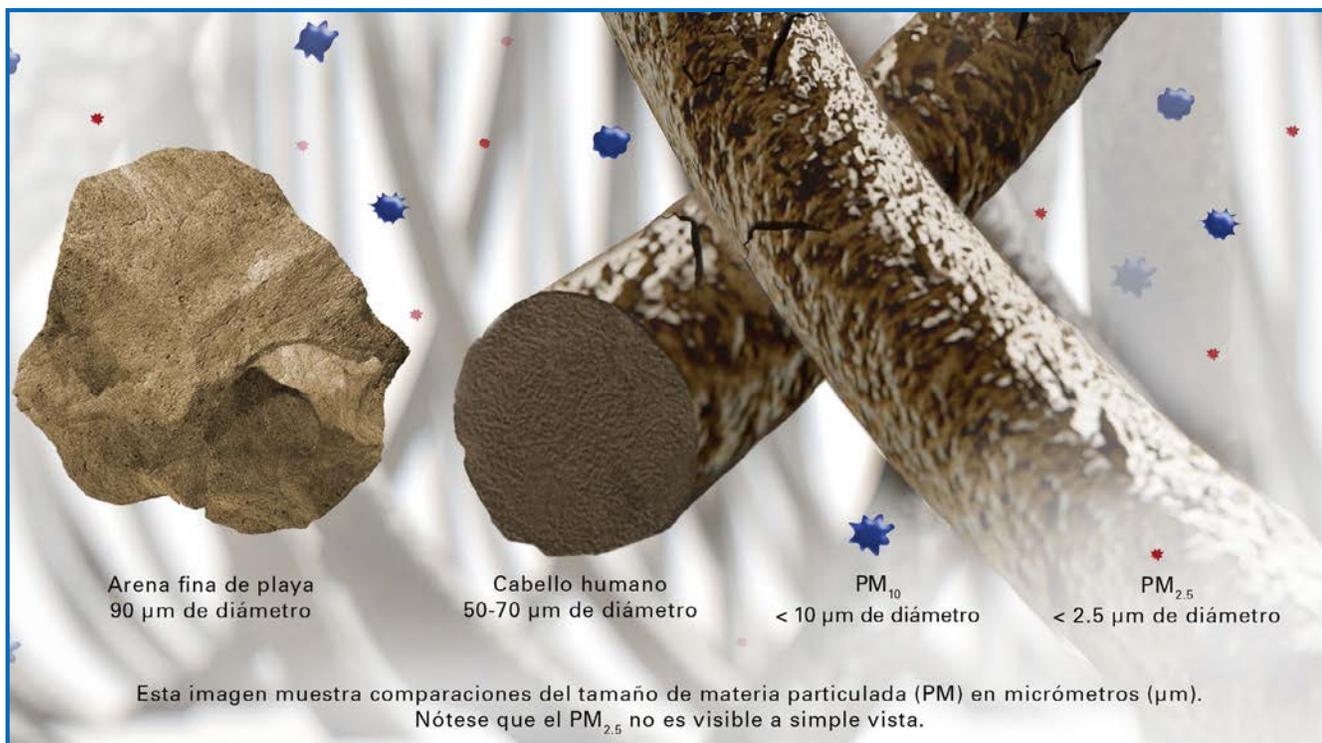


Figura 1. La imagen de arriba muestra el tamaño de partículas finas (PM_{2.5}) y gruesas (PM₁₀) comparándolas con un grano de arena y un cabello humano.

RESUMEN

Los contaminantes de aire comunes incluyen una amplia variedad de materia particulada (PM) y contaminantes gaseosos.

El PM suspendido en el aire oscila en tamaño desde unos cuantos nanómetros (nm) a decenas de micrómetros (μm) y está compuesto de materia biológica y no biológica. Las partículas en interiores son comúnmente categorizadas en partículas gruesas (PM₁₀) de 10 μm a 2.5 μm de diámetro, partículas finas (PM_{2.5}) de 2.5 μm o más pequeñas, y partículas ultrafinas de 1 μm (PM₁) o más pequeñas. Los tipos de partículas en interiores, generalmente clasificadas de más grande a más pequeña en tamaño, incluyendo polen, fibras esporas de hongos y fragmentos, polvo, caspa de mascotas, alergénicos, bacterias, emisiones vehiculares infiltradas del exterior, diferentes tipos de virus, y emisiones de humo de cigarro, de cocina, y otras fuentes de combustión.

Las partículas finas (PM_{2.5}) en el aire exterior se sabe que causan efectos adversos en la salud humana. La investigación en ensayos clínicos controlados compendiada en este documento confirma que las partículas finas son también un problema de salud en la exposición al aire interior. Para ilustrar sus tamaños relativos, la Figura 1 muestra PM grueso y fino comparado con cabello humano y con arena.

Las partículas biológicas en interiores incluyen microorganismos, esporas bacterianas y de hongos, y fragmentos de estas esporas. Estas partículas pueden entrar en las casas mediante rutas diversas. Las bacterias entran en las casas desde el exterior y también son emitidas por sus ocupantes como mascotas y seres humanos. Las esporas de hongos entran en las casas desde el exterior y pueden crecer en superficies internas cuando hay humedad. Las esporas de hongos pueden crecer dentro de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado

(HVAC) cuando se presenta la condensación en bucles de refrigeración, bandejas de drenaje, y el aislamiento térmico interior o en las superficies de la unidad de manejo del aire y los ductos.

Los contaminantes gaseosos que se encuentran en interiores incluyen compuestos orgánicos e inorgánicos. Los compuestos orgánicos incluyen un gran número de compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos de materiales de construcción, revestimientos arquitectónicos, y productos de consumo; compuestos orgánicos semi-volátiles como pesticidas y retardantes ignífugos; y aldehídos como el formaldehído de materiales de la construcción y otras fuentes. Los compuestos inorgánicos incluyen el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno emitidos de fuentes de combustión, el ozono que se infiltra del exterior y el radón que se infiltra desde el suelo. Nótese que la EPA no asegura que la purificación del aire reduzca los riesgos de salud asociados con el radón y sus derivados.

La forma más efectiva y económica de abordar la contaminación del aire interior es generalmente reducir o eliminar las fuentes evitables de contaminación y después sacar hacia el exterior las inevitables partículas, gases, y vapor de agua excesivo que se produce por actividades normales en interiores, como cocinar, hacer la limpieza y tomar duchas.

Más allá de minimizar las fuentes y sacar los contaminantes interiores al exterior, frecuentemente es posible diluir concentraciones de contaminantes ventilando la casa con aire limpio exterior. No obstante, las oportunidades de diluir el aire interior con aire exterior están frecuentemente limitadas por condiciones climáticas o por contaminantes en el aire exterior.

Cuando la reducción de fuentes y la dilución son insuficientes, los dispositivos de purificación de aire pueden ser útiles. Estos pertenecen a

dos categorías generales; purificadores de aire portátiles y filtros para sistemas de calefacción o HVAC y otros purificadores de aire instalados en ductos en el sistema central de HVAC de la casa.

Los purificadores de aire portátiles son unidades independientes que deben conectarse y encenderse para que funcionen. (N. de T. En inglés los purificadores de aire portátiles son conocidos como *air cleaners*, *air purifiers* o *air sanitizers*)

Los filtros para sistemas de calefacción y otros purificadores de aire instalados en ductos se instalan ya sea en la base de la unidad de manejo de aire o antes de la unidad en las rejillas de retorno. Así, éstos filtrarán el aire cada vez que el sistema de ventilación del HVAC esté en operación. Claramente, sin embargo no filtrarán el aire cuando el ventilador del HVAC no esté encendido, aun si el mismo dispositivo de purificación de aire este encendido o activado.

Muchos purificadores de aire portátiles e instalados en ductos combinan más de una tecnología de limpieza del aire para cumplir sus objetivos.

Hay dos tipos de tecnologías de limpieza del aire que son más comúnmente utilizadas en purificadores de aire instalados en ductos y portátiles para remover la partículas del aire: **filtros de materiales fibrosos** y purificadores de aire electrónicos (incluyendo **precipitadores electrostáticos [ESPs] e ionizadores**). Los filtros de materiales fibrosos eliminan las partículas del aire capturándolas en filtros hechos de material fibroso. Los ESPs los ionizadores eliminan las partículas por medio de un proceso activo de carga electrostática que requiere electricidad para cargar las partículas, que son atraídas y se adhieren a las placas con carga opuesta o a otras superficies interiores. Otro tipo de tecnología electrónica de purificación de aire

es la **irradiación germicida ultravioleta (UVGI)** que está diseñada para reducir el número de microorganismos viables suspendidos en el aire matándolos o desactivándolos.

Algunas de las tecnologías de limpieza del aire están diseñadas para eliminar contaminantes de aire gaseosos o convertirlos (idealmente) en derivados inocuos usando una combinación de procesos químicos y físicos. Las tecnologías de limpieza del aire de fase gaseosa incluyen **purificadores de aire de material adsorbente**, como **carbón activado**, **purificadores de aire de materiales químio-adsorbentes**, **oxidación fotocatalítica (PCO)**, **plasma**, y **generadores de ozono como purificadores de aire**. Comparando con el control de PM, el control de fase gaseosa es mucho más complejo. Solo se ha demostrado que purificadores de aire de materiales adsorbentes y químio-adsorbentes son purificadores de aire de fase gaseosa efectivos sin producir derivados potencialmente dañinos, sin embargo no todos los contaminantes del aire gaseosos son eliminados igualmente. Filtros de materiales adsorbentes tienen una capacidad limitada de absorción y consecuentemente deben contener suficiente material adsorbente para su aplicación y deben remplazarse regularmente.

Para un uso efectivo de purificadores de aire portátiles, los filtros para sistemas de calefacción u otros purificadores de aire instalados en ductos tengan un efecto positivo, es muy importante entender la diferencia entre los dos parámetros que influyen el desempeño de los dispositivos de purificación de aire: **eficiencia** y **eficacia**. La eficiencia de un dispositivo purificador de aire es una medida fraccional de su capacidad para reducir la concentración de contaminantes en el aire que pasa una vez por el dispositivo. La eficiencia fraccional de un dispositivo se mide en un laboratorio, donde todas las variables relevantes están controladas. La eficacia de

un dispositivo o sistema purificador de aire es una medida de su capacidad para eliminar contaminantes de los espacios que sirve en situaciones reales.

El parámetro más útil para entender la eficacia de purificadores de aire portátiles es la **capacidad de purificación del aire (CADR)**, que es la medida del suministro de aire relativamente limpio de purificador de aire portátil, expresado en pies cúbicos por minuto (cfm). El CADR es el producto de la eficiencia fraccional de eliminación de un contaminante específico y la tasa de flujo de aire a través del purificador de aire. Un CADR más alto en relación con el tamaño de la habitación aumentará la eficacia de un purificador de aire portátil. Teóricamente, se pueden generar CADRs para gases o para partículas; sin embargo, normas de ensayo actuales solo califican los CADR en la eliminación de partículas.

El parámetro más útil para entender la eficiencia de los filtros para sistemas de calefacción y otros purificadores de aire instalados en ductos es la eficiencia fraccional de eliminación de contaminantes para los cuales está diseñado para capturar. El método de ensayo de purificadores de aire de material fibroso para filtros de partículas instalados en ductos más ampliamente usado en los Estados Unidos es el ASHRAE Standard 52.2, el cual evalúa la eficiencia de remoción de partículas de 0.3 a 10 μm de diámetro. Los resultados se reportan como un **Valor Mínimo Reportado de Eficiencia (MERV)** que van de MERV 1 a MERV 16 basado en el promedio de eficiencia de remoción a través de tres categorías de tamaños de partículas: 0.3–1 μm , 1–3 μm , y 3–10 μm . Otros sistemas de medición de ensayos comunes comerciales patentados para purificadores de aire instalados en ductos incluyen **Clasificación de desempeño de micropartículas (MPR)** (*Microparticle Performance Rating*) y **Clasificación de rendimiento del**

filtro (FPR) (Filter Performance Rating); estos son sistemas de clasificación patentados. Generalmente entre más alta sea la clasificación del filtro, será más alta su eficiencia para eliminar las partículas en al menos una categoría de tamaños de partículas. No obstante que aunque existan normas para ensayos de eficiencia de eliminación de purificadores de aire de fase gaseosa instalados en ductos, estas no son aun ampliamente usadas y reportadas.

Resumen de la investigación

Un análisis exhaustivo de investigaciones actuales (de principios de 2018) indica lo siguiente:

Purificadores de aire y calidad del aire interior

- **Ensayos clínicos controlados de purificadores de aire que operan en hogares han encontrado que consistentemente hay una reducción estadísticamente significativa en las exposiciones a PM_{2.5}, PM₁₀ interior y al total del número de partículas cuando se usan purificadores de aire portátiles, mientras que los niveles de alérgenos en el polvo solo algunas veces se vieron afectados. Los ensayos con purificadores de aire en hogares que abordan los contaminantes de fase gaseosa son extremadamente limitados, y no se han demostrado reducciones constantes.**

La mayor parte de los ensayos han reportado reducciones en la exposición a PM con el uso de filtros de alta eficiencia para partículas en el aire (HEPA) u otros purificadores de aire de alta eficiencia portátiles en aproximadamente el 50 por ciento o más. Solo algunos ensayos investigaron el uso de filtración de partículas en sistemas centrales instalados en ductos, y las reducciones en exposición a PM no fueron tan constantes, en parte por los típicamente bajos tiempos de operación del sistema. Solo algunos estudios han investigado los efectos de purificadores de aire de fase gaseosa en casas.

Purificadores de aire y la salud

- **La mayoría de ensayos clínicos controlados han encontrado asociaciones estadísticamente significativas entre la introducción y el uso de purificadores portátiles de aire en casas y se ha encontrado al menos una medida o marcador de resultados de mejoras a la salud, aun cuando las mejoras han sido típicamente modestas.**

Resultados de salud específicos o marcadores de salud que han sido correlacionados con el uso de purificadores de aire portátiles en casas incluyen síntomas de asma y alergias y varios marcadores de efectos cardiovasculares que son comúnmente asociados con exposición a PM de origen interior y exterior. Sin embargo, la mayoría de las mejoras de salud fueron relativamente menores en magnitud y cuando se analizaron resultados múltiples, típicamente solo una fracción de resultados saludables o bio-marcadores de resultados de salud mejoraron. Hasta la fecha, no se encontraron estudios que investigaran sistemáticamente si el uso de filtros materiales adsorbentes de fase gaseosa, PCO, plasma o purificadores de aire ionizadores en casas o en otras edificaciones tienen un efecto positivo en la salud de los ocupantes.

Los purificadores de aire deben ser operados para ser efectivos

La cantidad de tiempo que un purificador de aire funcione, influye en su habilidad para reducir las concentraciones de contaminantes y los riesgos de salud asociados con estos. Si no son operados, no serán efectivos. Esto limita la eficacia de ambas categorías de purificadores de aire.

Típicamente, la purificación del aire está limitada a menos del 25 por ciento de las 8,760 horas en un año. En el caso de purificadores de aire portátiles, algunos ensayos clínicos controlados muestran que después de un periodo inicial de

uso y entusiasmo, el dispositivo no es mantenido apropiadamente, se usa menos frecuentemente, está completamente apagado, o almacenado, muchas veces porque la molestia que el ruido u otros factores causa a los usuarios.

Los purificadores de aire y el ruido

- **El ruido causado puede influir el uso de los purificadores de aire. Las clasificaciones de desempeño de los purificadores de air portátiles están determinadas por el flujo de aire máximo y por consecuencia a niveles máximos de ruido. Los niveles de ruido cuantificados rara vez se muestran en el embalaje de consumo del producto.**

Los niveles de ruido objetables pueden reducir el uso y desalentar la colocación de purificadores de aire en espacios para dormir, donde las personas pasan un gran porcentaje de su tiempo. Dado que el ruido rara vez se cuantifica o se reporta de manera estandarizada en el embalaje de consumo, puede ser difícil comparar los dispositivos en función de su clasificación de ruido. La etiqueta CADR en el empaque del producto es típicamente el CADR más alto registrado, lo que generalmente sucede al nivel de flujo de aire más alto. En los niveles de flujo de aire más bajos, un purificador de aire puede producir menos ruido, pero también será menos efectivo en la eliminación de contaminantes.

Filtros para sistemas de calefacción y eliminación de material particulado fino

- **Los filtros para sistemas de calefacción con un MERV 13 más alto requiere al menos un 50 por ciento de eficiencia en la remoción de partículas de 0.3–1 μm .**

Los filtros de partículas que son probados bajo el método de ensayo de la norma ASHRAE Standard 52.2—la norma de ensayo de filtros más ampliamente utilizada en Estados Unidos—no se requiere que se reporte su eficiencia fraccional

de eliminación para las partículas pequeñas que contribuyen más a las concentraciones de interiores $\text{PM}_{2.5}$ a menos que cumplan con un MERV 11 o más alto. Los filtros MERV 11 deben lograr al menos el 20 por ciento de eficiencia de eliminación para partículas de 0.3–1 μm , mientras que solo los MERV 13 y más altos requiere al menos 50 por ciento de eficiencia de remoción de partículas de 0.3–1 μm . Debido a que las altas concentraciones de partículas finas están asociadas con riesgos para la salud—especialmente en poblaciones sensibles como los niños, los ancianos y las personas con problemas respiratorios existentes como el asma y alergias—**la EPA recomienda que los consumidores a quienes les afecta las partículas pequeñas, elijan filtros de sistema de calefacción con al menos una clasificación MERV 13 o una clasificación MERV tan alta como la que soporten el ventilador del sistema y marco de soporte del filtro.** Sin embargo, la selección de cualquier filtro de sistemas de calefacción de materiales con más eficiencia—incluyendo MERV 13 a 16 o HEPA—se debe también tener en cuenta la compatibilidad del filtro con los ductos del sistema de HVAC existente para garantizar que no se impida el flujo del aire por la resistencia adicional del filtro. Para adaptar un filtro de horno de mayor eficiencia en una casa existente, es posible que un profesional capacitado necesite modificar el sistema.

Filtros del sistema de calefacción y operación del sistema de HVAC

- **La eficacia de los filtros del sistema de calefacción y otros purificadores de aire instalados en ductos está limitada por las horas de funcionamiento del ventilador en el sistema de HVAC en el que están instalados y si tienen un mantenimiento adecuado.**

En algunos lugares, como en los que no se necesita el aire acondicionado o donde el aire

acondicionado se obtiene con unidades de ventana, los sistemas centrales de HVAC pueden no funcionar o no funcionar durante muchos meses del año. Los cortos períodos de tiempo de funcionamiento del sistema pueden limitar en gran medida la eficacia del filtro del sistema de calefacción o de otro purificador de aire instalado en ductos simplemente porque no pasa aire por éstos el tiempo suficiente como para producir reducciones sustanciales en las concentraciones de contaminantes en interiores. Debido a estas limitaciones en la operación del sistema, datos experimentales y predicciones teóricas muestran que, para la eliminación de partículas, los filtros de sistemas de calefacción de eficiencia media-alta, como algunos filtros MERV 12 y la mayoría de los filtros MERV 13, probablemente sean casi tan efectivos como los filtros HEPA para reducir las concentraciones de la mayoría de los tamaños de partículas interiores, incluyendo las relacionadas con los efectos sobre la salud. Sin embargo, estudios de campo aún no han confirmado que los ventiladores de sistemas centrales de HVAC operen durante un tiempo suficiente para que los filtros de alta eficiencia de sistemas de calefacción y otros purificadores de aire instalados en ductos reduzcan concentraciones de partículas y gases interiores lo suficiente como para mejorar los resultados de salud. Además, ningún filtro o purificador de aire, sin considerar su clasificación, será efectivo si no se mantiene adecuadamente. Los fabricantes brindan orientación sobre la frecuencia con la que se deben reemplazar, limpiar o reparar los filtros para garantizar que funcionen como se espera.

Emisiones de subproductos de algunas tecnologías usadas en purificadores de aire

Algunas tecnologías de limpieza del aire pueden emitir subproductos potencialmente dañinos durante su uso. Por ejemplo, se ha demostrado que los purificadores de aire PCO

generan formaldehído, acetaldehído, dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono. [También se ha demostrado que los purificadores de aire de plasma forman partículas, ozono, monóxido de carbono y formaldehído como subproductos. Además, muchos dispositivos electrónicos de purificadores de aire—incluyendo los ESP portátiles y los instalados en ductos, los ionizadores o los generadores de iones, las lámparas UVGI sin recubrimiento y otros productos que anuncian el uso de “plasma”, “iones” y otros términos similares—pueden generar grandes cantidades del ozono. El ozono es un irritante pulmonar bien documentado. Los generadores de ozono no deben usarse en espacios habitables.

El uso en espacios habitables, de purificadores de aire que emiten ozono no ha sido aprobado por ninguna agencia federal. Los dispositivos generadores de ozono y ozono también se analizan con más detalle en [el documento] “Ozone Generators that are Sold as Air Cleaners”, [“Generadores de ozono que se venden como purificadores de aire”] de la EPA, que se encuentra en www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/ozone-generators-are-sold-air-cleaners.

La California Air Resources Board [Junta de Directores de Recursos de Aire de California] ordena que se realicen ensayos de dispositivos para la producción de ozono según la Norma UL 867, pero actualmente no existe una regulación nacional o programa voluntario que requiera una medición y certificación independientes de que la producción de ozono de estos dispositivos no alcance niveles peligrosos. Aparte de los requisitos de la California Air Resources Board, ninguna norma, regulación o programa consensuado de la industria de EUA requiere la medición y divulgación de la producción de ozono de purificadores de aire.

Selección y uso de purificadores de aire portátiles e instalados en ductos

Investigaciones sugieren que, al seleccionar y utilizar dispositivos de purificación de aire, los consumidores pueden tomar decisiones más informadas considerando los siguientes factores prácticos:

- **Tipos de purificadores de aire con mejoras documentadas en la calidad del aire interior y los efectos sobre la salud:** Los estudios de simulación y pruebas de campo muestran que los filtros de sistemas de calefacción de alta eficiencia (por ej., MERV 13 y más alto), purificadores de aire instalados en ductos y purificadores de aire portátiles con CADR altos puede reducir sustancialmente los niveles de partículas suspendidas en el aire y, en algunos casos, los contaminantes gaseosos en las casas. Los filtros de alta eficiencia con medios de material fibroso (incluidos los filtros con clasificación HEPA para los purificadores de aire portátiles y los filtros de horno MERV 13 y superiores para sistemas HVAC centrales) y los filtros de medios adsorbentes con cantidades adecuadas de material adsorbente son generalmente más efectivos y tienen la menor cantidad de limitaciones o consecuencias adversas. Adicionalmente, los estudios han demostrado que los purificadores de aire portátiles con CADR que son adecuados para el tamaño del espacio pueden reducir algunos efectos adversos para la salud y biomarcadores relacionados asociados con la exposición a PM en poblaciones sensibles como niños, personas con asma y alergias, y ancianos, así como en individuos sanos.
- **El ruido de los purificadores de aire portátiles:** El ruido es un problema importante con muchos purificadores de aire portátiles, especialmente cuando se operan al nivel más alto de flujo de aire, porque los

usuarios frecuentemente los apagan para evitar el ruido. El ruido puede ser un factor importante a la hora de seleccionar un purificador de aire.

- **Tamaño de los purificadores de aire portátiles:** Los purificadores de aire portátiles deben tener un CADR de capacidad suficiente para el tamaño de la habitación en la que es utilizado. Por ejemplo, un filtro de aire que tiene un CADR de 250 para partículas de polvo puede reducir los niveles de partículas de polvo a la misma concentración como se lograría añadiendo 250 cfm de aire limpio al espacio en cuestión. Unidades ensayadas de acuerdo a los procedimientos establecidos por la Association of Home Appliance Manufacturers (AHAM) [Asociación de Fabricantes de Electrodomésticos] llevan la etiqueta AHAM-Verified® que sugiere el tamaño máximo de la habitación que es el apropiado para el dispositivo. La clasificación de tamaño está destinada a proveer una reducción del 80 por ciento en los niveles de partículas (en condiciones de equilibrio) cuando se compara con niveles cuando no hay un purificador de aire en operación. Los purificadores de aire portátiles muchas veces alcanzan un CADR alto utilizando filtros HEPA, aunque otras tecnologías también pueden lograr un CADR de alto nivel.
- **Colocación de purificadores de aire portátiles:** Coloque purificadores de aire portátiles donde los ocupantes más vulnerables pasan la mayor parte de su tiempo. Los bebés, los ancianos y los asmáticos son más vulnerables que los adultos sanos. Un dormitorio puede ser un buen lugar para ubicar y operar un purificador de aire. También coloque purificadores de aire portátiles de manera que el aire limpio llegue a la zona de

respiración de los ocupantes tan directo como sea posible, sin obstrucción de muebles o adición de partículas finas provenientes de fuentes comunes como impresoras. De lo contrario, podría poner el aire en “cortocircuito”, en el que el flujo de salida no alcanza el área deseada. Adicionalmente, las instrucciones del fabricante pueden indicar que el purificador de aire debe colocarse a cierta distancia de cualquier objeto que pueda obstruir el flujo de aire.

- Considere la secuencia de las tecnologías de limpieza del aire en un purificador de aire:** Muchos purificadores de aire combinan dos o más tecnologías de limpieza del aire para lograr objetivos múltiples. El orden en que las tecnologías individuales están combinadas con respecto a la dirección del flujo de aire puede ser muy importante para determinar su eficacia. Por ejemplo, un filtro de carbón activado instalado aguas arriba de una tecnología de limpieza del aire que genera subproductos gaseosos sería menos efectivo para limitar las concentraciones de esos subproductos en interiores que un filtro de carbón activado instalado aguas abajo.
- Instalación de filtros de sistemas de calefacción y purificadores de aire instalados en ductos:** Los filtros de sistemas de calefacción y los purificadores de aire instalados en ductos deben estar accesibles para reemplazarlos regularmente, y para su inspección y mantenimiento requeridos. Algunos filtros de sistemas de calefacción y purificadores de aire instalados en ductos también pueden requerir modificaciones al sistema de HVAC para su instalación, como marco de soporte del filtro más amplio o energía eléctrica adicional. **Cualquier modificación e instalación del sistema debe ser realizada por un profesional capacitado.**
- Monitoreo y control:** Algunos purificadores de aire tienen funciones de monitoreo y control, como la capacidad de programar su uso, el control por medio de teléfonos inteligentes o monitoreo el estado del filtro. En la medida estas funciones provean más horas de funcionamiento cuando los espacios estén realmente ocupados (junto con limpieza o reemplazo más frecuente de los medios de filtración) estas funciones también deben ser capaces de mejorar la eficacia de purificación del aire del dispositivo.
- Sensores e indicadores de contaminantes:** Algunos purificadores de aire de grado para el consumidor ahora incluyen sensores de contaminantes o indicadores de algunas concentraciones de contaminantes en interiores, pero hasta la fecha no se encontraron estudios que hayan investigado su desempeño a lo largo del tiempo. Aunque pueden no ser tan precisos como los sensores de calidad profesional más caros, pueden proporcionar indicadores útiles de concentraciones de contaminantes relativos. Estos indicadores podrían proporcionar a los ocupantes información visual inmediata de que sus actividades actuales están aumentando o reduciendo las concentraciones de contaminantes. Estos indicadores también podrían utilizarse para controlar automáticamente el funcionamiento del dispositivo en respuesta a las concentraciones de contaminantes en tiempo real.
- Eliminación del olor a moho:** Algunos purificadores de aire pueden eliminar el olor a moho y el moho o las esporas bacterianas y sus fragmentos suspendidos en el aire. Sin embargo, los purificadores de aire no evitarán el crecimiento de moho, ni eliminarán el moho de la casa. Para eliminar permanentemente la fuente del olor a moho,

es necesario eliminar el crecimiento de moho y eliminar las fuentes de humedad que le permiten crecer.

- **Eliminación de olores químicos:** Los purificadores de aire que están diseñados únicamente para eliminar partículas no pueden controlar los contaminantes gaseosos, incluidos aquellos que contribuyen a los olores químicos. Por ejemplo, los purificadores de aire diseñados solo para eliminar partículas no eliminarán todos los olores compuestos o los contaminantes cancerígenos de la fase gaseosa del humo del tabaco.
- **Costos:** El costo también puede ser una consideración en el uso de purificadores de aire. Los costos mayores incluyen el precio de compra inicial, el mantenimiento (como limpiar o reemplazar filtros y partes) y la operación (como los costos de electricidad). También se debe considerar el costo de la instalación profesional de un filtro de medios actualizado o un filtro de aire electrónico en el sistema HVAC. Los purificadores de aire más efectivos (aquellos con altos índices de flujo de aire y sistemas eficientes de captura de contaminantes) son generalmente los más costosos. Los costos de mantenimiento y operación varían según el dispositivo, y estos costos deben considerarse al elegir una unidad en particular. El costo de operación es importante porque la limpieza del aire es un proceso continuo, y las unidades requieren el reemplazo del filtro o la limpieza y otro tipo de mantenimiento para seguir siendo efectivos. Aunque los sistemas centrales de HVAC pueden distribuir aire filtrado a más lugares en toda la casa, por lo general cuestan aproximadamente el doble de lo que cuesta el uso de un purificador de aire HEPA portátil típico al usarse durante un mismo período de tiempo.

INTRODUCCIÓN

La mejor manera de abordar la contaminación del aire interior residencial generalmente es controlar o eliminar la fuente de los contaminantes y ventilar la casa con aire limpio del aire exterior. Pero el control de la fuente a veces no es práctico como medida correctiva, y la ventilación puede verse limitada por las condiciones climáticas o los niveles de contaminantes en el aire exterior.

Si los métodos habituales de control de contaminantes del aire interior son insuficientes, los dispositivos de purificación de aire pueden ser útiles. Filtros de aire y otros dispositivos de purificación de aire están diseñados para eliminar los contaminantes del aire interior. Se pueden instalar en los ductos de la mayoría de los sistemas de HVAC domésticos para limpiar el aire en toda la casa, o se puede usar la misma tecnología en los purificadores de aire portátiles que limpian el aire en habitaciones individuales o áreas específicas. La mayoría de los dispositivos de purificación de aire están diseñados para eliminar partículas o gases, pero algunos destruyen, degradan o transforman los contaminantes que pasan a través de ellos.

Esta publicación está enfocada en purificadores de aire para uso residencial; no se ocupa de los purificadores de aire utilizados en estructuras grandes o comerciales como edificios de oficinas, colegios, edificios de apartamentos de gran altura, o edificios públicos. Debería ser particularmente útil para diseñadores profesionales de viviendas residenciales funcionarios a cargo de la salud pública y profesionales de calidad del aire en interiores. Además de proveer Información general sobre los tipos de contaminantes afectados por los purificadores de aire, este documento trata:

- Los tipos de dispositivos de purificación de aire y tecnologías disponibles

- Datos de medición que pueden usarse para comparar dispositivos de purificación del aire.
- La eficacia de dispositivos de purificación de aire en la eliminación de contaminantes del aire interior
- Información de ensayos clínicos controlados sobre el impacto que los purificadores de aire pueden tener en la salud y en marcadores de salud
- Factores adicionales a considerar a la hora de decidir si utilizar un dispositivo de purificación de aire y si es así, de qué tipo.

CONTAMINANTES DEL AIRE INTERIOR

Dos categorías principales de contaminantes del aire en interiores pueden afectar la calidad del aire en una casa: PM y contaminantes gaseosos.

PM puede estar compuesta de sólidos microscópicos, gotas de líquido o una mezcla de sólidos y gotas de líquido suspendidas en el aire. También conocida como contaminación de partículas, la PM puede estar compuesta de varios componentes, incluidos ácidos como los ácidos nítrico y sulfúrico, sustancias químicas orgánicas, metales, partículas del suelo o polvo y contaminantes biológicos. Entre las partículas que se pueden encontrar en una casa están:

- El polvo, como PM sólida
- Gases y humo, que son mezclas de partículas sólidas y líquidas
- Partículas de origen exterior, que son mezclas complejas de partículas sólidas y líquidas.
- Contaminantes biológicos, incluyendo virus, bacterias, polen, esporas y fragmentos de hongos, ácaros del polvo y partes del cuerpo de cucarachas, y excrementos de animales, y caspa animal

Las partículas existen en una amplia gama de tamaños. Las partículas pequeñas pueden ser ultrafinas, finas o gruesas. Una preocupación primordial desde el punto de vista de la salud, son las partículas finas de un diámetro de 2.5 μm o menor (es decir, $\text{PM}_{2.5}$). Estas partículas finas pueden inhalarse y penetran profundamente en los pulmones, donde pueden causar efectos agudos o crónicos sobre la salud. Las partículas ultrafinas, menores a 0.1 μm (100 nm) de diámetro, penetran en la región alveolar de los pulmones y pueden translocarse al cerebro a través del nervio olfativo. Las partículas gruesas, entre 2.5 y 10 μm de diámetro (es decir, $\text{PM}_{2.5-10}$), generalmente no penetran tan lejos en los pulmones; tienden a asentarse en el tracto respiratorio superior donde pueden irritar los ojos, la nariz y la garganta. Las partículas grandes tienen más de 10 μm de diámetro, o aproximadamente una sexta parte del ancho de un cabello humano. Estas pueden quedar atrapadas en la nariz y la garganta y se expulsan al toser, estornudar o tragar.

Las partículas finas son emitidas directamente al aire interior desde una variedad de fuentes, como humo de tabaco, chimeneas y conductos de aire que no están bien instalados o mantenidos, aparatos de combustión sin ventilación como estufas a gas y calefactores a gas o keroseno, estufas de leña, chimeneas, estufas eléctricas, impresoras, incienso, velas y reacciones al ozono con emisiones de fuentes interiores de compuestos orgánicos. Las partículas finas también incluyen partículas al aire libre que se infiltran en el interior (como emisiones de tráfico o humo de incendios forestales), virus y algunas bacterias.

Entre las partículas biológicas más pequeñas encontradas en casas se hallan algunas bacterias, moho y fragmentos y esporas bacterianas, algunos alérgenos de plantas, una fracción significativa

de la caspa de los gatos y perros, y una pequeña porción de partes y excrementos del ácaro del polvo. Las partículas más grandes incluyen polvo, polen, algunos fragmentos de hongos y esporas, una fracción más pequeña de caspa de gato y perro, una fracción significativa de partes del cuerpo de ácaros de polvo y partes y excrementos de cucarachas, y escamas de piel humana.

Las partículas biológicas, como las bacterias y las esporas y los fragmentos de hongos, ingresan a la casa por varias rutas, incluidas ventanas abiertas, juntas y grietas en las paredes, y en ropa y calzado, alimentos o mascotas. Los hongos y algunas bacterias se pueden encontrar en la etapa vegetativa o de spora de su ciclo de vida. Las bacterias y los hongos vegetativos están en la etapa de crecimiento y reproducción; no son esporas. Algunas bacterias forman esporas, una etapa inactiva caracterizada por una capa protectora gruesa, para sobrevivir en condiciones ambientales adversas. La mayoría de los hongos producen pequeñas esporas para reproducirse. Las esporas de hongos entrarán en la etapa de crecimiento y reproducción de su ciclo de vida en lugares donde haya suficiente humedad y nutrientes, como en las paredes de los sótanos, en los refrigeradores, en las bobinas de HVAC, en los purificadores de aire y en los recipientes de goteo.

Los contaminantes gaseosos incluyen gases inorgánicos como los gases de combustión (por ej., monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno), ozono y productos químicos orgánicos que no están adheridos a las partículas. Cientos de diferentes contaminantes gaseosos han sido detectados en el aire interior.

Las fuentes de gases de combustión en interiores incluyen aparatos de combustión como estufas a gas, humo de tabaco y vehículos de los cuales el humo del escape se infiltra de los garajes

adjuntos o del exterior. Las fuentes de ozono incluyen la infiltración desde el exterior y la generación intencional o no intencional por impresoras láser y algunos dispositivos vendidos como purificadores de aire.

Las fuentes de compuestos orgánicos gaseosos contenidos en el aire incluyen el humo del tabaco; materiales de construcción y mobiliario; y productos como pinturas, adhesivos, tintes, solventes, masillas, limpiadores, desodorantes, productos químicos de limpieza, ceras, materiales para pasatiempos y manualidades, y pesticidas. Los compuestos orgánicos también pueden provenir de cocinar; procesos metabólicos humanos, vegetales y animales; y fuentes exteriores.

El radón es un gas radioactivo incoloro e inodoro que puede encontrarse en el aire interior. Viene del radio en fuentes naturales como roca, suelo, agua subterránea, gas natural y materiales de construcción minerales (por ej., encimeras de granito). A medida que el uranio se descompone, libera radón, que a su vez produce partículas radiactivas de corta duración llamadas “progenie”, algunas de las cuales se adhieren a las partículas de polvo. La progenie de radón puede depositarse en los pulmones e irradiar los tejidos respiratorios. El radón normalmente se mueve a través del suelo y hacia una casa a través de grietas y agujeros en la base. El radón también puede estar presente en el agua de pozos y puede ser liberado al aire cuando esa agua se usa para ducharse y otras actividades domésticas. En un número reducido de casas, los materiales de construcción también pueden emitir una cantidad significativa de radón. La EPA no recomienda la purificación del aire para reducir los riesgos a la salud asociados con el radón y la progenie de radón.

TRES ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LOS CONTAMINANTES DEL AIRE INTERIOR

Tres estrategias básicas para reducir las concentraciones de contaminantes en el aire interior son el control de la fuente, la ventilación y la purificación del aire.

Control de fuente elimina las fuentes individuales de contaminantes o reduce su emisión.

Usualmente es la estrategia más efectiva para reducir los contaminantes. Muchas fuentes de contaminantes en la casa pueden evitarse o eliminarse (U.S. EPA 1995). Por ejemplo, se puede usar madera sólida o materiales alternativos en lugar de productos de madera prensada que probablemente son fuentes importantes de formaldehído. Los fumadores pueden fumar fuera de la casa. Los aparatos de combustión se pueden ajustar para disminuir sus emisiones. Cualquier área contaminada por el crecimiento microbiano no solo debe limpiarse y secarse, sino que también debe abordarse el problema de la humedad subyacente.

Ventilación con aire exterior también es una estrategia para diluir las concentraciones de contaminantes del aire interior, siempre que el aire exterior sea relativamente limpio y seco o que se pueda realizar a través de medios mecánicos como el filtrado. El aire exterior ingresa a los edificios de tres maneras. Pequeñas cantidades de aire entran constantemente por infiltración a través del recinto del edificio. Las cantidades más grandes ingresan cuando las ventanas y puertas se dejan abiertas por períodos prolongados y también pueden ser introducidas por un suministro continuo o por extractores.

La mayoría de los sistemas residenciales de calefacción de aire forzado y sistemas de aire acondicionado existentes en los Estados Unidos

no introducen intencionalmente aire exterior al interior de la casa. Sin embargo, la práctica de diseño residencial de sistemas de HVAC está cambiando. Las normas consensuadas actuales y algunos códigos de edificación residencial han cambiado recientemente para promover o requerir ventilación deliberada y continua usando aire exterior. Hasta la fecha, sin embargo, no existe un requisito o norma reglamentaria nacional que exija la eliminación de partículas finas o gases del aire exterior utilizado para la ventilación continua.

La extracción local del aire de la cocina al cocinar y de los baños al ducharse proporciona a los ocupantes una forma efectiva de lograr reducciones en las concentraciones elevadas de vapor de agua, partículas y gases que resultan de las actividades domésticas diarias. Sin embargo, considérese que el acto de extraer el aire de los baños o la cocina jala el aire exterior al interior de la casa. Por lo tanto, para obtener el mayor beneficio de la extracción, es importante que el aire de ventilación de reemplazo esté limpio y seco.

La purificación del aire ha demostrado ser útil cuando se usa junto con el control de la fuente y la ventilación, aunque no es un sustituto de ninguno de los métodos. La purificación del aire por sí sola no puede garantizar una calidad de aire interior adecuada donde haya fuentes de contaminantes significativas cuando la extracción de aire y la ventilación con aire exterior es insuficiente; o cuando las horas de funcionamiento de un dispositivo de purificación de aire no son suficientes para reducir las concentraciones de contaminantes en el interior. El resto de este documento se enfoca a la limpieza del aire. Para obtener más información, consulte también *ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning (ASHRAE 2015)* [Documento de la Posición de ASHRAE ante la Filtración y la Limpieza del aire].



Figura 2. Este gráfico muestra la instalación de un filtro de aire en un sistema de calefacción típico.

TIPOS DE PURIFICADORES DE AIRE

Hay dos categorías básicas de purificadores de aire: purificadores de aire portátiles; filtros instalados en unidades de calefacción o refrigeración y otros purificadores de aire instalados en ductos. Los purificadores de aire portátiles independientes generalmente están diseñados para filtrar o limpiar el aire en una sola habitación o área. Los filtros de sistemas de calefacción/refrigeración y otros purificadores de aire instalados en ductos se instalan en el sistema central de HVAC de una casa y pueden proporcionar aire filtrado o limpio a muchas partes de una casa, pero solo cuando el ventilador del sistema HVAC está funcionando.

Los filtros de sistemas de calefacción y otros dispositivos de purificación a de aire instalados en ductos se instalan típicamente en los ductos de retorno de los sistemas HVAC, como se muestra en la Figura 2. Se instalan en la base de la unidad de tratamiento de aire o aguas arriba en las rejillas de retorno. El filtro de aire del sistema de calefacción de baja eficiencia típico es un simple purificador de aire que captura partículas



Figura 3. Esta imagen muestra un ejemplo de instalación de un purificador de aire portátil típico.

en el flujo de aire para proteger de la suciedad los motores de los ventiladores, los intercambiadores de calor y los ductos. Estos filtros no están diseñados para mejorar la calidad del aire interior, pero el sistema HVAC se puede actualizar utilizando filtros de aire más eficientes para eliminar partículas adicionales. Otros dispositivos de purificación de aire, como los ESP, los purificadores de aire UVGI y una serie de filtros de fase gaseosa, se utilizan a veces en los ductos de los sistemas de HVAC residenciales. Estas tecnologías de limpieza del aire se describen con más detalle en las secciones siguientes.

Los **filtros de aire portátiles** están disponibles como unidades de mesa pequeñas y unidades de consola más grandes. Se utilizan para limpiar el aire en una habitación individual, como se muestra en la Figura 3, pero no en una casa completa. Las unidades se pueden mover a donde sea necesaria una limpieza de aire continua y localizada. Las unidades de consola más grandes pueden ser útiles en casas que no están equipadas con calefacción de aire forzado y/o sistemas de aire acondicionado.

Los componentes básicos de un filtro de aire portátil incluyen un filtro u otra tecnología de limpieza del aire y un ventilador que impulsa el aire a través de ese filtro/purificador de aire. Los purificadores de aire portátiles también pueden tener un filtro de panel con gránulos finos unidos de carbón activado, un filtro de carbón activado encerrado en un marco u otras mezclas de sorbentes para eliminar gases y compuestos olorosos. Más allá de la simple filtración y sorción de compuestos olorosos que utilizan carbón, algunos purificadores de aire portátiles agregan tecnologías adicionales para aumentar la eliminación, inactivación o conversión de contaminantes. Estas tecnologías pueden incluir la precipitación electrostática, la generación de iones o las lámparas ultravioleta (UV) en combinación con catalizadores para la conversión fotocatalítica de contaminantes gaseosos. Algunas unidades que se comercializan con la operación más silenciosa pueden no tener ventilador; sin embargo, las unidades sin ventilador son típicamente menos efectivas que las unidades con ventilador.

COMPRENDIENDO LA EFICIENCIA FRENTE A LA EFICACIA

Para utilizar purificadores de aire portátiles, los filtros de sistemas de calefacción u otros purificadores de aire instalados en ductos, es fundamental comprender la diferencia entre dos parámetros que influyen en el rendimiento de los dispositivos de limpieza de aire: **eficiencia** y **eficacia**.

Eficiencia: la eficiencia de un dispositivo de limpieza de aire es una medida fraccional de su capacidad para reducir la concentración de contaminantes en el aire que pasa una vez por el dispositivo. La eficiencia de un dispositivo se mide en un laboratorio, donde se controlan todas las variables relevantes. Los índices de eficiencia

permiten la comparación entre diferentes dispositivos cuando se ensayan en las mismas condiciones (por ej., el mismo caudal, velocidad del aire, concentraciones de contaminantes).

Eficacia: la eficacia de un dispositivo o sistema de purificación de aire es una medida de su capacidad para eliminar contaminantes de los espacios en los que se opera.

La eficacia del dispositivo o sistema es una función de su uso en situaciones de la vida real. Aunque esto puede simularse bajo condiciones controladas en un espacio de ensayos de laboratorio, la eficacia en el uso de cualquier dispositivo depende de muchos factores, incluidos su ubicación, instalación, velocidad de flujo de aire y horas de funcionamiento. De hecho, estos factores pueden influir más en su eficacia real que la ensayada en un laboratorio. Como ejemplo, si bien un dispositivo dado puede tener una alta eficiencia medida en laboratorio y certificada, su eficacia (es decir, su efecto sobre las concentraciones de contaminantes en el espacio ocupado al que sirve) será cero si no pasa aire a través de ese dispositivo porque se apaga, o si pasa muy poco aire a través del dispositivo porque la capacidad del ventilador es insuficiente o si su funcionamiento es intermitente, o si su medio de filtración está tan obstruido que poco o ningún aire puede pasar por él.

Adicionalmente, la tasa de eliminación del purificador de aire también debe ser competitiva con otros procesos de eliminación que ocurren dentro del espacio para que sean efectivos (Batterman et al. 2005; Shaughnessy y Sextro 2006). Otros mecanismos de eliminación dentro del espacio incluyen el depósito en superficies (para partículas) o la adsorción (para gases), las reacciones del aire interior (típicamente para gases) y la ventilación (intercambio de aire exterior). Por ejemplo, un purificador de aire

usado en un espacio con varias ventanas abiertas puede ser menos efectivo que cuando se opera en un espacio con ventanas cerradas, ya que la ventilación a través de las ventanas abiertas probablemente sea un mecanismo de eliminación más dominante (suponiendo que el aire exterior sea más limpio que el interior aire).

TIPOS DE TECNOLOGÍAS DE LIMPIEZA DEL AIRE

Dentro de cada categoría de purificadores de aire, se pueden usar una o más **tecnologías de limpieza del aire** para lograr sus objetivos, y algunas tecnologías de limpieza del aire tienen claras ventajas sobre las otras. Las tecnologías disponibles varían en el tipo de contaminante que pueden eliminar o reducir (por ejemplo, diferentes tamaños de PM, diferentes tipos de gases, microbios flotantes en el aire), su mecanismo de acción (por ejemplo, recolección de contaminantes, conversión, inactivación, destrucción) y posibles efectos secundarios de su uso (por ejemplo, requisitos de uso de energía primaria, impactos secundarios en el rendimiento del equipo, emisiones directas de contaminantes, formación de contaminantes secundarios) (ASHRAE 2008; NAFA 2007). La Tabla 1 resume las tecnologías de limpieza del aire más comúnmente utilizadas que están disponibles en los productos en el mercado y el tipo de contaminantes que estas tecnologías están diseñadas para controlar. Cada tecnología se describe con más detalle en las siguientes secciones. La lista no incluye otras estrategias potenciales de limpieza del aire, como los recubrimientos de materiales diseñados para eliminar de forma pasiva los contaminantes gaseosos o los métodos de biofiltración, como las plantas ornamentales en macetas o los muros verdes activos.

Nótese que los “gases” son gases inorgánicos (por ej., monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono) y gases orgánicos (por ejemplo, compuestos orgánicos volátiles, aldehídos).

Los recubrimientos pasivos de material (Darling et al. 2016) y los muros verdes activos (Soreanu et al. 2013; Waring 2016) han mostrado cierta promesa, pero no están disponibles en el mercado, y las investigaciones publicadas sobre su eficacia aún son limitadas. Se ha demostrado que las plantas en macetas son ineficaces y poco prácticas para la eliminación de contaminantes porque no hay flujo de aire activo y el número de plantas necesarias para limpiar el aire eficientemente no es factible en la mayoría de los entornos (Cruz et al. 2014; Girman et al. 2009; Waring 2016).

Tecnologías de limpieza del aire utilizadas para eliminar partículas

Se utilizan dos tipos de tecnologías de limpieza del aire en purificadores de aire, portátiles e instalados en ductos, para **eliminar partículas del aire: filtros de aire de medios fibrosos y purificadores de aire electrónicos**. Los dispositivos de purificación del aire diseñados únicamente para eliminar partículas son incapaces de controlar los gases y algunos olores. Por ejemplo, no eliminarán el olor y muchos de los contaminantes cancerígenos de fase gaseosa del humo del tabaco y el olor a humedad/mohoso de la contaminación microbiana. Las partículas de humo de tabaco líquido atrapado por un filtro de aire pueden emitir gases orgánicos olorosos (Offermann et al. 1992).

El tamaño y la masa de las partículas afectan el rendimiento de ambos tipos de tecnologías de limpieza del aire porque las partículas primero deben estar suspendidas en el aire para ser eliminadas. Ya sea que estén instalados en

Tabla 1. Resumen de las tecnologías de limpieza del aire

| Tecnología de limpieza del aire | Contaminantes del aire interior | Mecanismos de acción | Ventajas | Desventajas | Normas de ensayo (y métricas de clasificación) |
|--|---------------------------------|--|---|---|--|
| Medios de filtración de material fibroso | Partículas | <p>Recolección: las fibras del filtro capturan partículas</p> <ul style="list-style-type: none"> Los medios de filtración mecánica dependen únicamente de las fuerzas mecánicas Los medios cargados electrostáticamente (es decir, "electret") usan fibras mecánicas con una carga electrostática aplicada para recolectar partículas con carga opuesta, lo que mejora la eficiencia de remoción | <ul style="list-style-type: none"> Si la eficiencia nominal es alta, pueden tener excelentes capacidades de eliminación para de partículas de diferentes tamaños Los filtros de medios mecánicos mejoran la eficiencia con la carga | <ul style="list-style-type: none"> Se requiere reemplazarlos constantemente Los filtros de partículas usados pueden ser una fuente de contaminación sensorial/olores Caídas de alta presión en algunos medios de filtración de material fibroso pueden afectar negativamente a los sistemas de HVAC Los filtros de medios electret tienen una reducción de su eficiencia bajo cargas [mayores] Complicado por el número de normas de ensayos y métricas de clasificación | <p>Filtros:</p> <ul style="list-style-type: none"> Norma ANSI/ASHRAE 52.2 (MERV) ISO 16890 (ePM) ISO 29463 (HEPA) Normas de ensayo de patente (FPR, MPR) <p>Purificadores de aire portátiles:</p> <ul style="list-style-type: none"> AHAM AC-1 (CADR) |
| Precipitación electrostática (ESP) | Partículas | <p>Recolección: el cable de la descarga de corona carga las partículas entrantes, las cuales a su vez se acumulan en placas con carga opuesta</p> | <ul style="list-style-type: none"> Puede tener una alta eficiencia de remoción para una amplia gama de tamaños de partículas Baja caída de presión e impactos mínimos en los sistemas HVAC Bajos requisitos de mantenimiento | <ul style="list-style-type: none"> A veces los ESP tienen un alto nivel de tasas de generación de ozono y de óxido de nitrógeno La eficiencia típicamente disminuye con la carga y las placas requieren limpieza Requieren un alto consumo de energía eléctrica | <p>Norma ANSI/UL 867 para seguridad eléctrica y emisiones de ozono (similar a IEC 60335-2-65) (aprobado/no aprobado; sin métrica de clasificación)</p> |
| Ionizadores (es decir, generadores de iones) | Partículas | <p>Recolección: de manera similar a ESP, los ionizadores utilizan un cable de alto voltaje o un cepillo de fibra de carbono para cargar eléctricamente las moléculas de aire, lo cual produce iones negativos que se unen a las partículas suspendidas en el aire; luego, las partículas cargadas se recogen en placas con carga opuesta del purificador de aire o se atraen a otras superficies en la habitación y se depositan en otro lugar</p> | <ul style="list-style-type: none"> Requieren un consumo de energía típicamente bajo Silencioso Bajo mantenimiento | <ul style="list-style-type: none"> Genera ozono Típicamente baja eficacia debido a muy bajas tasas de flujo de aire y de capacidad de purificación de aire (CADR) | <p>Ninguna específica para ionizadores, aunque se puede usar AHAM AC-1 para medir el CADR</p> |
| Irradiación germicida ultravioleta (UVGI) | Microbios | <p>Destrucción: la luz UV mata/inactiva los microbios que flotan en el aire</p> | <ul style="list-style-type: none"> Puede ser efectivo a alta intensidad con suficiente tiempo de contacto Se puede utilizar para desactivar microbios en bobinas de enfriamiento y otras superficies | <ul style="list-style-type: none"> Las lámparas sin recubrimiento pueden generar ozono. Posibilidad de lesiones oculares La eficacia aumenta con la intensidad de la lámpara, que es típicamente baja en purificadores de aire residenciales UVGI Requieren un alto consumo de energía eléctrica Inactiva pero no elimina los microbios | <p>Irradiación del aire:</p> <ul style="list-style-type: none"> Norma ANSI/ASHRAE 185.1 <p>Irradiación de la superficie:</p> <ul style="list-style-type: none"> Norma ANSI/ASHRAE 185.2 |

Tabla 1 (continuación). Resumen de las tecnologías de limpieza del aire

| Air-cleaning technology | Targeted indoor air pollutant(s) | Mechanism(s) of action | Advantages | Disadvantages | Test standards (and rating metrics) |
|-------------------------|----------------------------------|---|---|---|---|
| Medios adsorbentes | Gases | Recolección: los gases se adsorben físicamente en medios con una amplia área de superficie (típicamente carbón activado) | <ul style="list-style-type: none"> • Potencial de alta eficiencia de remoción para muchos contaminantes gaseosos en purificadores de aire con cantidades suficientes de materia absorbente o reactiva para la aplicación • No forman subproductos | <ul style="list-style-type: none"> • Se requiere que se reemplacen continuamente porque se agota su capacidad de adsorción y la adsorción física es un proceso reversible, y puede ser que los contaminantes no sean eliminados permanentemente. • Eficacia de muchos sistemas de clasificación residencial con pequeñas cantidades de carbono activado es desconocido • Caídas de alta presión en algunos medios de filtro sorbente pueden afectar negativamente a los sistemas de HVAC. • Diferente eficiencia de eliminación para diferentes gases en diferentes concentraciones • Los métodos de ensayo estándar no son ampliamente utilizados | <p>Medios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Norma ANSI/ASHRAE 145.1 (sin clasificación métrica) <p>Purificadores de aire instalados en ductos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Norma ANSI/ASHRAE 145.2 (no clasificación métrica) No hay Normas de eficacia |
| Medios quimisorbentes | Gases | Recolección: los gases se adsorben químicamente en medios recubiertos o impregnados con compuestos reactivos | <ul style="list-style-type: none"> • Potencial para una alta eficiencia de remoción para muchos contaminantes gaseosos. • La quimisorción es un proceso irreversible, lo que significa que los contaminantes son eliminados permanentemente | <ul style="list-style-type: none"> • Se requiere que se reemplacen continuamente porque su capacidad de quimisorción se agota • Se desconoce la eficacia de muchos sistemas de clasificación residencial • Las altas caídas de presión en algunos medios de filtro sorbente pueden afectar negativamente a los sistemas HVAC • Diferente eficiencia de eliminación para diferentes gases en diferentes concentraciones | <p>Medios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ANSI/ASHRAE Standard 145.1 (sin clasificación métrica) <p>Purificadores de aire instalados en ductos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Norma ANSI/ASHRAE 145.2 (sin clasificación métrica) <p>No hay estándares de eficacia</p> |
| Oxidación catalítica | Gases | Conversión: la mayoría utiliza oxidación fotocatalítica (PCO) en la cual un medio de área de superficie alta está recubierto con dióxido de titanio como catalizador; Los gases entrantes se absorben en el medio y las lámparas UV irradian y activan el dióxido de titanio, que reacciona con los gases adsorbidos para transformarlos químicamente | <ul style="list-style-type: none"> • Pueden degradar una amplia gama de gases contaminantes (por ej., aldehídos, aromáticos, alcanos, olefinas, hidrocarburos halogenados) • Pueden combinarse con medios adsorbentes para mejorar la eficacia | <ul style="list-style-type: none"> • Puede generar subproductos dañinos como formaldehído y acetaldehído y ozono • No hay métodos de ensayo estándar • Frecuentemente la eficiencia de eliminación es relativamente baja para muchos gases interiores, pero la variabilidad es alta en eliminación de diferentes gases • Falta de estudios de campo para validar el rendimiento • El catalizador frecuentemente tiene una vida útil corta | Ninguna específica para PCO |

Tabla 1 (continuación). Resumen de las tecnologías de limpieza del aire

| Air-cleaning technology | Targeted indoor air pollutant(s) | Mechanism(s) of action | Advantages | Disadvantages | Test standards (and rating metrics) |
|-------------------------|----------------------------------|---|--|---|--|
| Plasma | Gases | Conversión: la corriente eléctrica se aplica para crear un arco eléctrico; Los gases entrantes son ionizados y los enlaces se rompen para transformar químicamente los contaminantes gaseosos | <ul style="list-style-type: none"> • Pueden tener una alta eficiencia de eliminación • Se puede combinar con otras tecnologías de limpieza del aire (por ejemplo, PCO) para mejorar el rendimiento y minimizar formación de subproductos | <ul style="list-style-type: none"> • Una amplia variedad de tipos de generación de plasma produce confusión sobre cómo un producto funciona en realidad • Los subproductos se forman a partir de muchas tecnologías de plasma, incluyendo partículas, ozono, formaldehído, monóxido de carbono, cloroformo, óxidos de nitrógeno, y una gran cantidad de otros gases orgánicos • La mayoría de los estudios han investigado la eliminación de gases mientras que menos de ellos han evaluado la eliminación de partículas | Ninguna específica para plasma |
| Generación de ozono | Gases | Conversión: generación de ozono mediante descarga corona, UV u otro método para oxidar compuestos olorosos y otros gases | <ul style="list-style-type: none"> • Reacciona con muchos gases interiores. • Se puede combinar con otras tecnologías menos dañinas, como medios adsorbentes | <ul style="list-style-type: none"> • Altas tasas de generación de ozono. • Altas cantidades de formación de subproductos • Puede causar degradación a materiales de interiores | Ninguna específica para generadores de ozono |

Nótese que los “gases” son gases inorgánicos (por ej., monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono) y gases orgánicos (por ejemplo, compuestos orgánicos volátiles, aldehídos).

los conductos de los sistemas de HVAC o que se usen en purificadores de aire portátiles, la mayoría de los filtros de aire tienen una buena clasificación de eficiencia para eliminar partículas gruesas. Estas partículas incluyen el polvo, el polen, algunas esporas de moho, la caspa de los animales y las partículas que contienen ácaros del polvo y partes del cuerpo de las cucarachas y excrementos. **Sin embargo, debido a que estas partículas de mayor tamaño se asientan fuera del aire y sobre las superficies más rápidamente, es factible que los purificadores de aire no los eliminen de manera efectiva de las casas** (Institute of Medicine 2000; Shaughnessy y Sextro 2006; Wood 2002). Por lo tanto, ya que muchos alérgenos de interiores son partículas gruesas, el control efectivo de los alérgenos requiere limpieza de rutina y control del polvo. Para más información sobre el control de alérgenos, visite: www.epa.gov/asthma.

Si bien las actividades humanas como caminar, barrer y aspirar pueden lanzar de nuevo las partículas al aire, la mayoría de las partículas más grandes se volverán a caer otra vez antes de ingresar al sistema de HVAC o al purificador de aire portátil para ser eliminadas por un filtro de aire de partículas. También se debe considerar que una fracción significativa de los alérgenos de gatos y perros y una pequeña porción de los alérgenos de los ácaros del polvo asociados con las heces de los ácaros se transportan en pequeñas partículas. En consecuencia, se dispersan más fácilmente en toda la casa, permanecen flotando en el aire por más tiempo y es más factible que los purificadores de aire los eliminen (Custovic 1998; Luczynska 1988).

Purificadores de aire con medios de material fibroso

Los **purificadores de aire con medios de material fibroso** eliminan partículas al capturarlos en el material fibroso del filtro. Estos purificadores

varían ampliamente en su capacidad para eliminar partículas. La eficiencia de eliminación de partículas depende de una serie de parámetros incluyendo el tamaño de las partículas, la velocidad de entrada, el espesor del filtro, la porosidad del filtro, las dimensiones de la fibra del filtro, las condiciones de carga de polvo y si el fabricante ha modificado o no los medios para que inicialmente tengan una carga electrostática en las fibras (Por ej., medios electret vs. no electret). En general, los filtros de material fibroso sin carga electrostática tienden a aumentar la eficiencia con la carga de polvo a lo largo del tiempo, y los filtros de medios fibrosos con una carga electrostática inicialmente tienden a disminuir en eficiencia con la carga de polvo a medida que la carga [electrostática] disminuye con el tiempo. Sin embargo, los filtros que con cargas [de polvo] excesivas tenderán a disminuir la eficacia de un filtro de sistema de calefacción o de un purificador de aire portátil debido a la reducción del flujo de aire a través del filtro y/o al aumento del flujo de aire de derivación alrededor de un filtro obstruido, por lo que es importante seguir las recomendaciones del fabricante para cambiar el filtro regularmente.

Métricas de prueba para filtros de aire con medios de materia fibroso

Los fabricantes utilizan una serie de normas de ensayo para evaluar la eficiencia de eliminación de partículas de los filtros de aire de medios fibrosos. La eficiencia de eliminación se caracteriza típicamente por diferentes tamaños de partículas (para filtros de aire de sistemas de calefacción) o por diferentes fuentes y tamaños de partículas (para purificadores de aire portátiles). El método de ensayo de filtros de aire de medios de material fibroso más ampliamente utilizado para filtros de partículas instalados en ductos en los Estados Unidos es la Norma ASHRAE 52.2, que es una norma de consenso nacional que evalúa la eficiencia de eliminación de partículas

de 0.3 a 10 μm de diámetro. Los resultados se informan como un **MERV** que varía de MERV 1 a MERV 16 en función de la eficiencia promedio de remoción en tres rangos de tamaño de partícula, incluidos 0.3–1 μm , 1–3 μm y 3–10 μm . Otras métricas de prueba para los filtros de aire en el ducto incluyen la propiedad exclusiva **MPR (Clasificación de desempeño de micropartículas)** y **FPR (Clasificación de rendimiento de filtro)**. Ninguno de estas normas de ensayo mide la eficiencia de eliminación de partículas menores de 0.3 μm , aunque técnicamente es posible medir por debajo de 0.3 μm , como lo hacen frecuentemente los laboratorios de investigación.

En general, cuanto más alta sea la clasificación MERV, mayor será la eficiencia de eliminación de un filtro para al menos un rango de tamaño de partícula probado en la norma de ensayo ASHRAE 52.2. Sin embargo, solo los filtros MERV 11 y superiores se someten a pruebas explícitas para determinar su capacidad para eliminar las partículas más pequeñas de 0.3 a 1 μm que son de mayor preocupación para la salud porque constituyen una fracción significativa de las concentraciones de masa de $\text{PM}_{2.5}$. Los filtros MERV 11 deben alcanzar al menos 20 por ciento de eficiencia de remoción para partículas de 0.3 a 1 μm , mientras que solo MERV 13 y superiores requieren al menos 50 por ciento de eficiencia de remoción para partículas de 0.3 a 1 μm . También se debe considerar que una norma de ensayos de filtro reciente publicado por la Organización Internacional de Normalización (*ISO 16890-1: 2016: Filtros de aire para ventilación general—Parte 1: Especificaciones técnicas, requisitos y sistema de clasificación basado en la eficiencia de la materia particulada [ePM]*) fue desarrollado para abordar explícitamente la remoción de partículas en base a las concentraciones de masa de PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_1 , pero todavía no se usa ampliamente en los Estados Unidos (ISO 2016; Stephens 2018; Tronville y Rivers 2016).

Filtros de aire de partículas de alta eficiencia (HEPA)

En purificadores de aire residenciales, los filtros descritos como filtros HEPA son generalmente equivalentes a MERV 16 y ofrecen la mayor eficiencia disponible de eliminación de partículas de los filtros de aire de medios fibrosos para una amplia gama de tamaños de partículas.

Nótese que, en ámbitos del cuidado de la salud y el medio industrial, la designación HEPA tiene características de rendimiento más explícitas y precisamente definidas, y se aplican normas de ensayo más rigurosas para su uso. Aun cuando los filtros de aire residenciales designados HEPA generalmente son de un alto rendimiento similar a MERV 16, no existe una definición ampliamente aceptada del rendimiento de la HEPA en productos de consumo. Así, es poco probable que los productos de consumo sean equivalentes en rendimiento a los sistemas de filtro designados por HEPA utilizados en edificios de atención médica y de procesos industriales. Pero aún, tienen una eficiencia de eliminación muy alta (es decir, generalmente del 99% o más) para los tamaños de partículas reportados en ensayos.

Tipos de filtros de aire con medios de material fibroso

Los filtros planos o de panel son filtros relativamente económicos, generalmente compuestos por fibras gruesas de vidrio, pelo de animales recubiertos, fibras vegetales, fibras sintéticas (como poliéster o nailon), espumas sintéticas, lanas metálicas o metales y láminas expandidas. El medio de filtración puede ser pre-tratado previamente por el fabricante con una sustancia viscosa, como el aceite, que hace que las partículas se adhieran a las fibras. **Los filtros de aire planos o de panel tienen típicamente un MERV de 1 a 4** y, por lo tanto, tienen una eficiencia de remoción muy baja para la mayoría de los tamaños de partículas, aunque con una eficiencia ligeramente mayor para partículas

grandes (MacIntosh et al. 2008; Stephens y Siegel 2012, 2013). Estos filtros suelen ser de aproximadamente 1-2 pulgadas de espesor. Se usan comúnmente en sistemas de calefacción residenciales y sistemas de aire acondicionado, y también se usan frecuentemente como filtros previos para filtros de mayor eficiencia. En su mayor parte, dichos filtros en aplicaciones en conductos se usan solo para proteger el equipo HVAC de la acumulación de materiales no deseados en los motores de los ventiladores, intercambiadores de calor y otras superficies, en lugar de proteger a los ocupantes de la exposición a partículas finas suspendidas en el aire.

Los filtros de almohadilla plisada, de superficie extendida y no plegada tienen típicamente un MERV de 5 a 13 o más alto y generalmente tienen una mayor eficiencia de eliminación de partículas para la mayoría de los tamaños de partículas en comparación con los filtros de panel. Sin embargo, su eficiencia de eliminación para partículas más pequeñas varía sustancialmente según su MERV e incluso puede variar dentro de diferentes marcas y modelos de filtros con la misma clasificación de MERV (U.S. EPA 2008). Plisar el medio filtrante aumenta el área de la superficie, reduce la velocidad del aire a través de los medios de filtración y permite el uso de fibras más pequeñas y una más alta densidad de empaquetado del filtro sin una gran caída en la tasa de flujo de aire. Además, estos filtros frecuentemente tienen una vida útil más larga debido a su mayor área de superficie. Se puede utilizar un marco de alambre en forma de bolsillo o separadores de cartón en forma de V para mantener el espacio de los pliegues. Los medios utilizados en los filtros plisados pueden ser almohadillas de fibra, fibras de vidrio unidas, fibras sintéticas, fibras de celulosa, fieltro de lana y otras mezclas de materiales de algodón y poliéster.

La resistencia al flujo de aire de estos filtros generalmente, pero no necesariamente, aumenta

a medida que aumenta el MERV para un espesor dado. La razón por la que la resistencia al flujo de aire no necesariamente aumenta con MERV es que los filtros con clasificación MERV más alta frecuentemente utilizan más medios de filtración al aumentar el pliegue y el espesor del filtro. Sin embargo, los filtros con medios cargados electrostáticamente pueden tener clasificaciones MERV más altas sin una mayor resistencia al flujo de aire. Se utilizan tres tipos principales de medios cargados electrostáticamente: lana de resina, una película plástica o una fibra llamada electret (un polímero pulverizado electrostáticamente). Su carga electrostática atrae y captura partículas. Las fibras de los filtros de electret son algo más grandes que las fibras de otros filtros planos, lo que resulta en una caída de presión relativamente baja y una mayor eficiencia en el filtrado de partículas más pequeñas.

Los filtros de mayor eficiencia con un MERV de 14 a 16 típicamente tendrán una mayor resistencia promedio al flujo de aire que los filtros de eficiencia media del mismo espesor, aunque la mayoría de los fabricantes ahora confían en filtros de profundidad extendida y pliegues extensos para lograr estas altas clasificaciones de MERV con baja resistencia al flujo de aire.

Los filtros HEPA son otro tipo de filtro plisado. También tienen pliegues muy profundos con una superficie mucho mayor que los filtros plisados convencionales. En consecuencia, eliminan las partículas finas y ultrafinas con mayor eficiencia que los filtros de aire de medios fibrosos de clasificación inferior.

La Figura 4 muestra un ejemplo de varios productos de filtros de aire de medios fibrosos residenciales disponibles comercialmente para aplicaciones en conductos centrales, que van desde filtros MERV 4 de fibra de vidrio de 1 pulgada a filtros MERV 16 de pliegues profundos de 5 pulgadas.

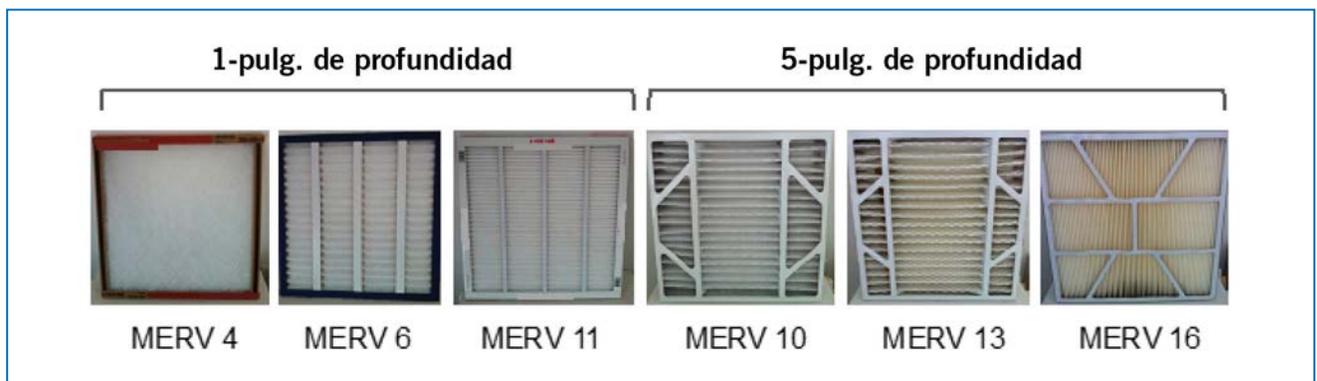


Figura 4. Ejemplos de varios filtros de medios de materiales fibrosos instalados en ductos para aplicaciones residenciales de aire central disponibles en el mercado. Imagen cortesía de Brent Stephens.

Consideraciones prácticas para el uso de filtros de aire de medios de material fibroso

El rendimiento de los filtros de aire de medios de material fibroso en residencias depende no solo de la eficiencia de remoción de los medios, sino también de factores tales como:

- Tamaño de partículas interiores y concentraciones de masa específicas del tamaño
- Cantidad de polvo acumulado en el filtro de aire
- Velocidad de flujo de aire, velocidad y resistencia al flujo de aire a través de los medios de filtración
- Flujo de aire de derivación que fluye alrededor, en lugar de a través, del filtro de aire debido a una instalación deficiente
- Tiempo de funcionamiento del sistema o dispositivo, que regula la cantidad de aire que pasa a través del filtro

El tamaño de las partículas afecta en gran medida la eficiencia de eliminación y la probabilidad de eliminación mediante filtros de aire de medios fibrosos. La mayoría de los filtros de aire de medios de material fibroso tienen una curva de eficiencia de eliminación en forma de U, que varía según el tamaño de las partículas en la que se produce la mayor eficiencia de eliminación tanto para las

partículas más grandes (por ejemplo, $> 3 \mu\text{m}$) como para las más pequeñas (por ejemplo, $< 0.03 \mu\text{m}$) (Figura 5). Sin embargo, estos mismos tamaños de partículas también tienden a tener las tasas de depósito más altas en interiores, lo que significa que se depositan en las superficies rápidamente (U.S. EPA 2008). Esto significa que el depósito en las superficies y la eliminación por filtros compiten entre sí por la eliminación de partículas y que incluso un filtro de muy alta eficiencia puede no tener un efecto tan grande en las concentraciones de partículas en interiores como se esperaba (Lee et al. 2015). Además, debido a que la eliminación del filtro es una función importante del tamaño de las partículas, la distribución del tamaño subyacente de las partículas interiores dentro de la casa puede influir enormemente en la magnitud de las reducciones en concentraciones en masa de PM (Azimi et al. 2014, Stephens, 2018).

La carga de polvo afectará la eficiencia de eliminación de los filtros de aire de medios fibrosos de diferentes maneras para diferentes tamaños de partículas. Aunque es difícil hacer generalizaciones con los datos disponibles ya que los productos de filtros varían mucho, los filtros que se basan únicamente en medios mecánicos para eliminar partículas típicamente tienen una eficiencia mejorada para algunos rangos de tamaño de partículas (particularmente partículas gruesas) a medida que se cargan de polvo con el tiempo

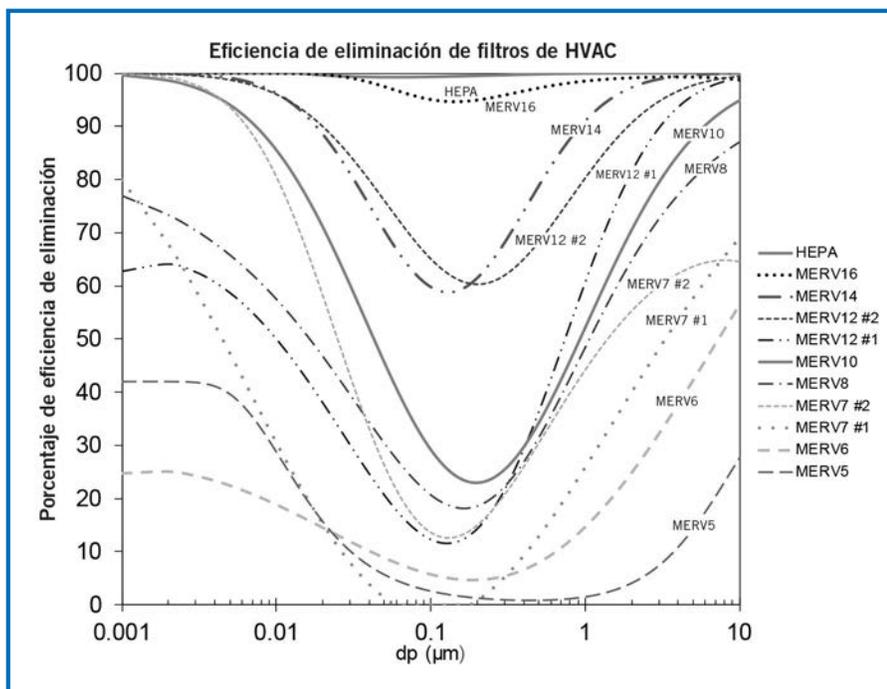


Figura 5. Curvas típicas de eficiencia de eliminación resuelta por tamaño para filtros de aire de medios de material fibroso nuevos (y limpios) clasificados por la métrica MERV según los ensayos reportados en Azimi et al. (2014). Reimpreso de Atmospheric Environment, Vol 98, Parham Azimi, Dan Zhao, y Brent Stephens, Estimate of HVAC filtration efficiency for fine and ultrafine particles of outdoor origin, páginas 337-346, derechos reservados, (2014) usado con permiso de Elsevier.

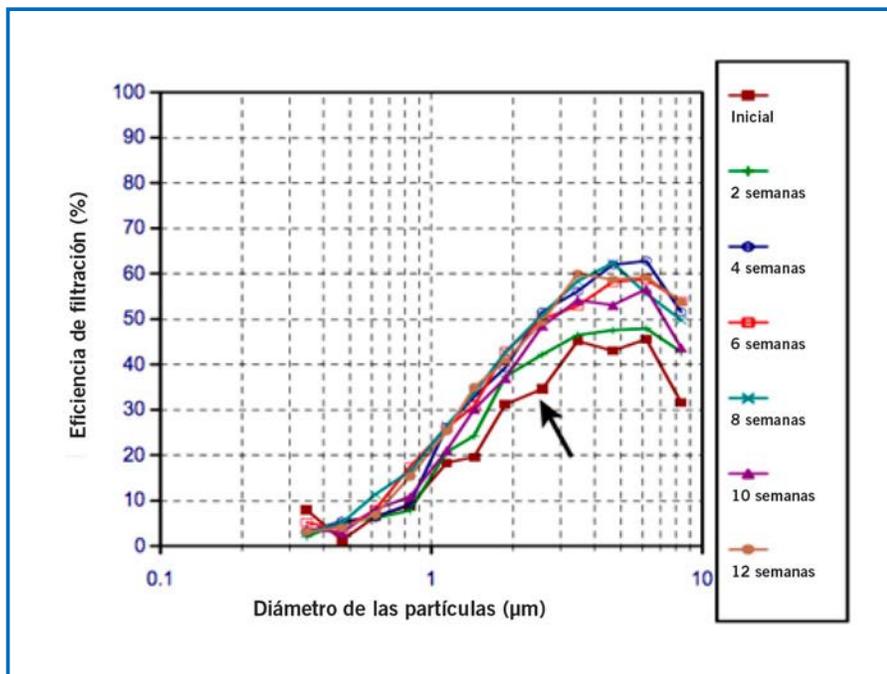


Figura 6. Ejemplo de curvas de eficiencia de eliminación resuelta por tamaño para filtros de aire de medios de material fibroso nuevos (MERV 5 cuando están limpios) y filtros de aire cargados, que no sean electret, de medios de materiales fibrosos como lo indican los ensayos reportados en Hanley and Owen (2003). ©ASHRAE del ASHRAE Research Project Final Report 1190-RP.

(Figura 6) (Hanley et al. 1994; Hanley y Owen 2003; Owen et al. 2003; U.S. EPA 2008). A la inversa, la eficiencia de eliminación de los filtros electret a veces disminuye para algunos tamaños de partículas (incluidas las partículas finas y ultrafinas) a medida que el medio se carga con partículas debido a que la carga disminuye con el tiempo (Figura 7) (Hanley et al. 1994; Hanley y Owen 2003; Owen et al. 2003; US EPA 2008). Además, tanto la resistencia de funcionamiento inicial como la final de un filtro completamente cargado de polvo también deben tenerse en cuenta en el diseño de una combinación de sistema y filtro, ya que es la resistencia máxima contra la cual opera el ventilador. También vale la pena señalar que la carga del filtro y los aumentos de caída de presión son una función de muchos factores, incluido el tipo de filtro, la eficiencia de eliminación con el tiempo, las concentraciones de partículas en el interior y los tiempos de ejecución del sistema (Stephens et al. 2010; Waring y Siegel 2008).

El flujo de aire, la velocidad y la resistencia al flujo de aire a través de los medios de filtración afectarán el rendimiento de los filtros de aire de medios de material fibroso instalados en cualquier sistema que tenga un ventilador. La caída de presión a través los filtros de medios de material fibroso suele ser mayor que en los filtros de aire electrónicos y aumentará lentamente durante la vida útil del filtro a medida que se cargue con el tiempo (Stephens et al. 2010). Los filtros planos o de paneles típicamente tienen un grosor de solo 1 a 2 pulgadas, tienen una baja resistencia al flujo de aire y son relativamente económicos. Los filtros de superficie plisada o extendida del mismo espesor típicamente tendrán una mayor caída de presión y una mayor resistencia al flujo de aire. Sin embargo, los filtros de superficie más plisada o extendida, que pueden tener un espesor de hasta 4 a 12 pulgadas, aumentarán el área del medio de filtración y limitarán la resistencia al flujo de aire del filtro. **La selección de cualquier filtro de medios de mayor eficiencia también**

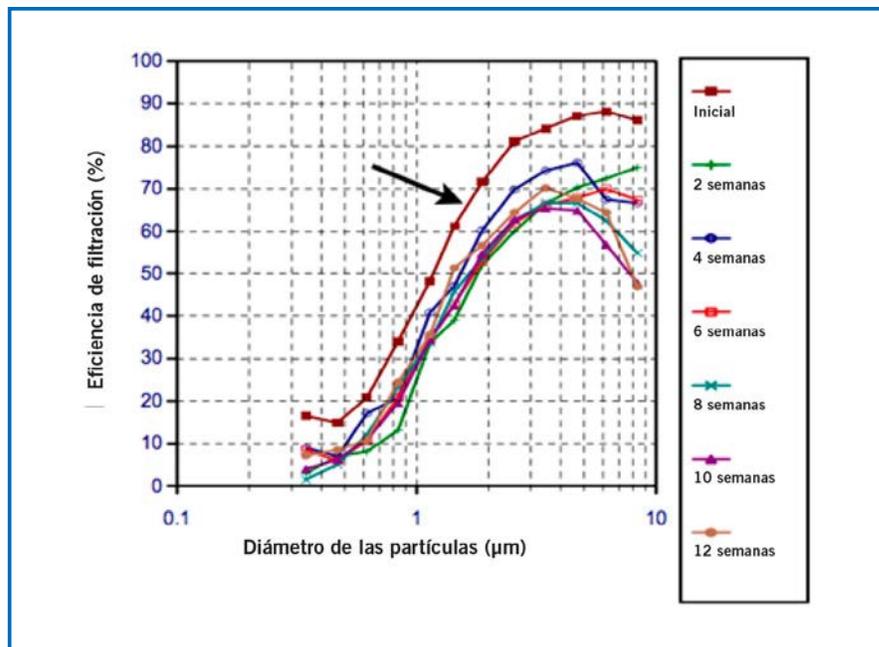


Figura 7. Ejemplo de curvas de eficiencia de eliminación resuelta por tamaño para filtros de aire de medios de material fibroso nuevos (MERV 11 cuando están limpios) y filtros de aire cargados, que no sean electret, de medios de materiales fibrosos como lo indican los ensayos reportados en Hanley and Owen (2003). ©ASHRAE del ASHRAE Research Project Final Report 1190-RP.

debe tener en cuenta la compatibilidad del filtro con el sistema de distribución de aire existente para garantizar que la resistencia adicional no obstaculice el flujo de aire. Es posible que se requieran modificaciones en el sistema para instalar una renovación que se ajuste a un medio de filtro de mayor eficiencia. Además, los filtros instalados en la rejilla de retorno en lugar de en la unidad de manejo de aire también pueden tener un efecto menor en la resistencia general del flujo de aire, ya que frecuentemente son más grandes tanto en área como en espesor.



Figura 8. Ejemplo de gran cantidad de flujo de aire de derivación alrededor de un filtro en una unidad de manejo de aire debido a una instalación inapropiada combinada con carga excesiva que incrementa la caída de presión a través del filtro más allá de lo que el filtro era capaz de soportar. Fotografía cortesía de Brent Stephens.

El flujo de aire de derivación que fluye alrededor de un filtro de aire debido a una instalación deficiente reducirá la eficacia del filtro de aire.

Los canales recorridos por el aire a través de un filtro instalado en un filtro de aire portátil o en un sistema HVAC central son importantes para determinar la eficacia (por ej., véase la Figura 8). El propietario de la casa debe instalar filtros de sistemas de calefacción y purificadores de aire instalados en ductos de sistemas HVAC, de modo que se minimicen las fugas del aire que se derive del filtro; [para esto] es esencial seguir

las instrucciones de instalación del fabricante. La eficacia de filtros de aire instalados en ductos puede reducirse sustancialmente debido a fugas de aire que fluyan alrededor de filtros instalados en marcos o juntas mal emparejados o mal construidos. (VerShaw et al. 2009). Otra forma de flujo de aire de derivación también incluye fugas en el flujo desde espacios no acondicionados por medio del conducto de retorno, que puede eludir el filtro si se instala en una rejilla de retorno, en lugar de en la base de una unidad de manejo de aire.

Precipitadores electrostáticos (ESP) e ionizadores

Los ESP y los ionizadores son purificadores de aire electrónicos que utilizan un proceso electrostático motorizado para cargar partículas, que luego se atraen a las placas con carga opuesta u otras superficies interiores para eliminar las partículas en el aire.

Los **ESP** usan un cable de alto voltaje para añadir una carga eléctrica a las partículas entrantes, que luego se recogen en las placas con carga opuesta dentro del filtro de aire. Los ESP eliminan y recolectan partículas pequeñas suspendidas en el aire y frecuentemente tienen una eficiencia inicial de eliminación de un solo paso del 60 por ciento o más para la mayoría de los tamaños de partículas, aumentando hasta en un 95 por ciento dependiendo de la tasa de flujo de aire (cuanto más baja es la tasa de flujo de aire, mayor es la eficiencia de eliminación) (Morawska et al. 2002). Esta eficiencia será mayor para los ESP limpios, pero su eficiencia disminuye a medida que las placas recolectoras se cargan con partículas (Howard-Reed et al. 2003; Wallace et al. 2004). Los ESP también pueden tener diferentes eficiencias de eliminación para partículas con composiciones diferentes, ya que las propiedades eléctricas de algunas partículas afectarán su capacidad para mantener una carga.

Los **ionizadores**, o generadores de iones, usan un alambre de alto voltaje o un cepillo de fibra de carbono para cargar eléctricamente las moléculas de aire, lo que produce iones negativos que se unen a las partículas suspendidas en el aire. Posteriormente, las partículas cargadas pueden adherirse a las superficies cercanas, como paredes o muebles (es decir, sin placa), o entre sí, y asentarse más rápido. Los generadores de iones son la forma más simple de filtro de aire electrónico y están disponibles como unidades de mesa, portátiles o montadas en el techo. Sin embargo, debido a que los ionizadores normalmente no utilizan ventiladores para mover el aire más allá del filtro de aire, los ionizadores generalmente tienen CADR muy bajos para la mayoría de los tamaños de partículas (Waring et al. 2008). Además, las partículas cargadas que resultan de la operación del ionizador se depositarán sobre las superficies de las habitaciones, como paredes y cortinas (Melandari et al. 1983; Offermann et al. 1985). Debido a que estas partículas depositadas permanecen en la habitación o área, pueden volverse a elevar de las superficies cuando son perturbadas por actividades humanas como caminar o pasar la aspiradora, especialmente aquellas mayores de aproximadamente 2 μm (Ferro et al. 2004; Qian y Ferro 2008).

Posibles efectos negativos de la carga de partículas

Otro factor a considerar relacionado con los generadores de iones es el efecto de la carga de partículas al depositarse en el tracto respiratorio. Los experimentos han demostrado que el depósito de partículas en el tracto respiratorio aumenta a medida que las partículas se cargan, por lo que el uso de generadores de iones no puede reducir la dosis de partículas a los pulmones (Melandari et al. 1983; Offermann et al. 1985). El efecto de la carga en partículas muy finas resulta en su mayor tasa de depósito en los pulmones en comparación

con el de las partículas sin carga. Además, los ESP y los ionizadores pueden producir un crujido al acumular polvo, lo que puede ser una molestia para algunos ocupantes.

Precauciones con respecto a la producción de ozono por ESP y ionizadores

Como los filtros de aire de medios fibrosos, los ESP y los ionizadores pueden instalarse en sistemas HVAC o usarse en unidades portátiles. Aunque los ESP y los ionizadores eliminan partículas pequeñas (incluidas las partículas ultrafinas), no eliminan los gases ni los olores (Poppendieck et al. 2014; Sultan et al. 2011; Waring et al. 2008). Y debido a que los ESP y los ionizadores utilizan alto voltaje para generar campos ionizados, pueden producir ozono, ya sea como un subproducto o por diseño (U.S. EPA 2014). El ozono es un irritante de los pulmones que presenta riesgos para la salud.

Algunos purificadores de aire portátiles que usan PES e ionizadores producen ozono como un subproducto (Consumers Union 2005; Waring et al. 2008; Jakober y Phillips 2008). Algunas marcas y modelos de PES e ionizadores pueden aumentar las concentraciones de ozono en interiores que incluso pueden superar los estándares de salud pública (Morrison et al. 2014). El California Air Resources Board, en virtud del Reglamento del Título 17 para limitar las emisiones de ozono de los dispositivos de limpieza del aire interior (Código de Reglamentos de California 2009), certifica a los purificadores de aire con respecto a la producción de ozono. El Reglamento del Título 17 se basa en un método de prueba para evaluar las emisiones de ozono de los filtros de aire descritos en la Norma ANSI/UL 867 (UL 2011), que también es similar al método descrito en IEC 60335-2-65 (IEC 2015).

Además, incluso en concentraciones por debajo de los estándares de salud pública, el ozono

reacciona con sustancias químicas emitidas por fuentes comunes en el interior, como productos de limpieza para el hogar, ambientadores, desodorantes, ciertas pinturas, pulimentos, pisos de madera, alfombras y linóleo. Las reacciones químicas producen subproductos dañinos que pueden estar asociados con efectos adversos para la salud en algunas poblaciones sensibles. Los subproductos que pueden resultar de las reacciones con el ozono incluyen partículas ultrafinas, formaldehído, otros aldehídos, cetonas, peróxidos, ácidos orgánicos (Shaughnessy y Sextro 2006; U.S. EPA 2014; Wechsler 2006). Los dispositivos de generación de ozono y ozono se discuten en el documento de la EPA “Ozone Generators that are Sold as Air Cleaners”, [“Generadores de ozono que se venden como purificadores de aire”], que se pueden encontrar en: www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/ozone-generators-are-sold-air-cleaners.

Purificadores de aire por irradiación germicida ultravioleta (UVGI)

Otro tipo de tecnología electrónica [usada en] purificadores de aire, UVGI, está diseñado para reducir la cantidad de microorganismos viables suspendidos en el aire.

La tecnología UVGI

Purificadores de aire UVGI están diseñados para usar lámparas UV para matar o desactivar microorganismos como virus, bacterias y esporas y fragmentos de hongos que se encuentran suspendidos en el aire o que crecen en superficies (por ej., serpentines de enfriamiento, bandejas de drenaje, conductos, filtros). Tanto los UV-A (onda larga: 315–400 nm) como los UV-C (onda corta: 100–280 nm) se utilizan en los filtros de aire UVGI. La mayoría de las lámparas UV que se usan para desactivar microorganismos en entornos residenciales son lámparas de vapor de mercurio a baja presión que emiten radiación UV-C

principalmente a una longitud de onda de 254 nm, que ha demostrado tener efectos germicidas (VanOsdell y Foarde 2002). Dado el tiempo de exposición y la potencia de la lámpara suficientes, la luz UV puede penetrar en la estructura externa de las células de un microorganismo y alterar su ADN, evitando la replicación y causando la muerte celular. Pero algunas esporas bacterianas y de moho son resistentes a la radiación UV, y para lograr una desactivación confiable de las esporas, la potencia de iluminación debe ser alta y los tiempos de exposición deben ser largos (es decir, en el orden de minutos y horas en lugar de los pocos segundos típicos de la mayoría de los filtros de aire UVGI).

Tipos de limpiadores UVGI y su eficacia

Existen dos tipos de aplicaciones UVGI en las residencias: purificadores de aire diseñados para la desinfección de la corriente de aire para reducir la viabilidad de los microorganismos a medida que fluyen a través del sistema HVAC o el purificador de aire portátil, y limpiadores de superficies diseñados para la desinfección de superficies que se usan más comúnmente para prevenir el crecimiento de microorganismos en los serpentines de enfriamiento dentro de un sistema HVAC (Kowalski y Bahnfleth 2000; VanOsdell y Foarde 2002). Las lámparas UVGI para la desinfección de la corriente de aire o la superficie generalmente están ubicadas en el conducto de aire de un sistema HVAC aguas abajo del filtro y aguas arriba del serpentín de enfriamiento o en un filtro de aire portátil aguas abajo del filtro. Hay dos normas de ensayos disponibles para evaluar objetivamente la eficacia de los sistemas y componentes UVGI. Las lámparas UVGI para la irradiación de la corriente de aire en el conducto se ensayan utilizando la Norma ANSI / ASHRAE 185.1 (ASHRAE 2015b), y las lámparas UVGI para la irradiación de la superficie por inducción se analizan utilizando la Norma ANSI/ASHRAE 185.2 (ASHRAE 2014).

Si se diseña correctamente, el limpiador UVGI en una aplicación **típica de desinfección de la corriente de aire** tiene el potencial de reducir la viabilidad de las bacterias y los mohos vegetativos y proporcionar reducciones de virus de bajas a moderadas, pero poca o ninguna reducción de las esporas bacterianas y de moho (CDC 2003; Kowalski y Bahnfleth 2000; Levetin et al. 2001). Las esporas tienden a ser resistentes a la radiación UV, y matarlas requiere una dosis muy alta (Cundith et al. 2002; VanOsdell and Foarde 2002; Xu et al. 2002).

Los limpiadores UVGI en una aplicación de **desinfección de superficies** se instalan en unidades de manejo de aire para prevenir o limitar el crecimiento de bacterias y mohos vegetativos en superficies húmedas en el sistema HVAC (Kowalski y Bahnfleth 1998, 2000; Levetin et al. 2001; Luongo y Miller 2016). Un estudio informó una reducción del 99 por ciento en los contaminantes microbianos que crecen en las superficies de HVAC expuestas, pero una reducción de las bacterias suspendidas en el aire solo del 25 al 30 por ciento (Menzies et al. 2003). Una razón por la que la aplicación de desinfección de la superficie proporciona solo una reducción ligeramente perceptible en las concentraciones microbianas en el aire puede ser que los microorganismos en la corriente de aire estén expuestos a la luz UV durante un tiempo más corto. A la inversa, a los microorganismos que crecen en las superficies de HVAC expuestas se les da exposición directa prolongada a los rayos UVGI. Otro estudio encontró que las lámparas UV-C producían un crecimiento microbiano reducido en el revestimiento del ducto y en las bandejas de drenaje de las unidades de manejo de aire, pero advirtieron que el control de la humedad, los procesos HVAC de deshumidificación y refrigeración adecuadamente diseñados, las bandejas de drenaje diseñadas para drenar y la instalación de superficies no

porosas aguas abajo de las bobinas deben seguir siendo colectivamente los enfoques primarios para controlar el crecimiento microbiano en unidades de manejo de aire (Levetin et al. 2001). Limitar el crecimiento microbiano en las bobinas de enfriamiento tiene otros beneficios, como mejorar la velocidad de transferencia de calor de la bobina, lo que mejora la eficiencia energética (Wang et al. 2016a, b).

La exposición directa prolongada a los rayos UVGI puede destruir el crecimiento microbiano vegetativo, pero no la mayoría de las esporas, en las superficies de las unidades de ventilación forzada, filtros, serpentines de enfriamiento o bandejas de drenaje. Matar los mohos y las bacterias mientras se encuentran en un estado vegetativo susceptible reduce la formación de esporas adicionales. La radiación UV no es efectiva para matar microorganismos si proliferan dentro de los medios de filtración, grietas del sistema, aislamiento térmico poroso o revestimientos de material fibroso que absorben el sonido (Kowalski y Bahnfleth 2000).

Varios estudios informan que los elementos de rendimiento más importantes de un sistema UVGI son el tipo de lámpara UV y balastro, humedad relativa, temperatura, velocidad del aire y reflectividad del conducto (Kowalski y Bahnfleth 1998; Philips Lighting 1985, 1992; Scheir y Fencel 1996; VanOsdell y Foarde 2002). La eficacia de los limpiadores UVGI para matar microorganismos también puede variar según la dosis de irradiación UV, el diseño y la aplicación del sistema, las características de funcionamiento del sistema y el microorganismo objetivo para la desactivación. Algunos limpiadores UVGI utilizados en sistemas HVAC o purificadores de aire portátiles se anuncian para reducir los alérgenos de ácaros del polvo, microorganismos del aire (por ejemplo, virus, bacterias, mohos) y sus esporas y contaminantes gaseosos del interior

aire. Sin embargo, es probable que la destrucción efectiva de los virus en el aire y las esporas de hongos y bacterias requiera exposiciones a UV mucho más altas que las que proporciona una unidad de limpieza de aire residencial UVGI típica (Kowalski y Bahnfleth 2000; Scheir y Fencel 1996; VanOsdell y Foarde 2002). No se encontraron investigaciones o estudios que demuestren que la desinfección con UV sea eficaz para reducir la alergenicidad de los ácaros del polvo y los hongos o que la radiación UV tenga el potencial de eliminar los contaminantes gaseosos. Las partículas fúngicas vivas o muertas pueden causar reacciones alérgicas en poblaciones sensibles. Por lo tanto, los limpiadores UVGI podrían no ser eficaces para reducir los síntomas de alergia y asma. Si el moho crece en interiores, debe eliminarse y deben abordarse las condiciones que conducen a su crecimiento (U.S. EPA 2001).

El mantenimiento regular de los sistemas UVGI es crucial y generalmente consiste en limpiar el polvo de las lámparas y reemplazar las viejas. Se deben seguir las recomendaciones de los fabricantes con respecto a las precauciones de seguridad, los criterios de exposición, el mantenimiento y el monitoreo asociados con el uso de los sistemas UVGI.

[Desventajas de los limpiadores UVGI](#)

Al igual que los ESP, los limpiadores UVGI pueden generar grandes cantidades de ozono como un subproducto de su operación (Morrison et al. 2014). Las lámparas UV-C no recubiertas que emiten luz UV con una longitud de onda de 254 nm e inferior pueden generar ozono a través de la fotólisis del oxígeno y una reacción adicional (por ejemplo, $3O_2 \rightarrow \text{fotólisis} \rightarrow 2O_3$). Debido a este problema, algunos fabricantes aplican un recubrimiento especial a las lámparas UV (por ejemplo, lámparas de cuarzo fundido dopadas) para inhibir la producción de ozono.

La Regulación del Título 17 para Limitar las Emisiones de Ozono de los Dispositivos de Limpieza de Aire en Interiores del *California Air Resources Board* que se basa en el método de prueba ANSI / UL Standard 867 para evaluar las emisiones de ozono de los purificadores de aire (Código de Regulaciones de California 2009) certifica a los purificadores de aire UVGI con respecto a ozono. Otra norma de prueba, IEC 60335-2-65, Edición 2.2 2015-01, documenta procedimientos similares para medir la producción de ozono a partir de dispositivos de limpieza de aire.

No existe un método de ensayo estándar específico para evaluar y comparar la eficacia de los limpiadores UVGI instalados en sistemas de HVAC residenciales o purificadores de aire portátiles. Los purificadores de aire UVGI típicos diseñados para uso en hogares no suministran dosis suficientes de UV para matar o desactivar de manera efectiva la mayoría de los microorganismos flotando en el aire porque el período de exposición es demasiado corto y/o la intensidad es demasiado baja. **Por lo tanto, UVGI no parece ser efectivo como único dispositivo de control. Cuando se usa UVGI, se debe usar además de, no como un reemplazo para, los sistemas de filtración de partículas convencionales, ya que UVGI no captura ni elimina partículas** (CDC 2003). Las partículas biológicas muertas o desactivadas aún pueden contener irritantes, alérgenos y/o toxinas. El uso de UVGI además de los filtros HEPA u otros filtros de alta eficiencia (p. ej., MERV 13 y superiores) en sistemas HVAC o en unidades portátiles ofrece solo beneficios mínimos de control de infecciones sobre los proporcionados solo por los filtros (CDC 2003; Kowalski y Bahnfleth 1998). Sin embargo, el UVGI puede ser eficaz para inhibir el crecimiento biológico en los serpentines de enfriamiento HVAC y las bandejas de drenaje como resultado de tiempos de exposición más largos.

Tecnologías de limpieza del aire utilizadas para eliminar gases

Algunas tecnologías de limpieza del aire están diseñadas para eliminar gases o convertirlos (idealmente) en subproductos inofensivos utilizando una combinación de procesos físicos y químicos. Las tecnologías de limpieza del aire en fase gaseosa incluyen filtros de aire de medios adsorbentes, PCO, plasma y generadores de ozono vendidos como purificadores de aire. (Tenga en cuenta que los generadores de ozono que se venden como purificadores de aire no deben utilizarse en espacios ocupados. Para obtener más información, visite www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/ozone-generators-are-sold-air-cleaners). Ninguno de estos Las tecnologías están diseñadas explícitamente para eliminar partículas. Todos los dispositivos de limpieza de aire en fase de gas en el ducto se pueden probar con la Norma ANSI/ASHRAE 145.2, aunque su uso sigue siendo algo limitado (ASHRAE 2016). No existe un método de prueba de campo in situ estandarizado para evaluar el rendimiento del limpiador de aire en fase gaseosa con una métrica similar a la del CADR, aunque un estudio propuso un método de prueba que utilizaba un solo COV (decano) como fuente representativa de contaminantes gaseosos en una casa de pruebas y otra extendió una metodología similar para evaluar la eliminación de tres COV en una cámara de prueba (Howard-Reed et al. 2008; Kim et al. 2012; Sidheswaran et al. 2012).

Medios adsorbentes

Los filtros de aire adsorbentes utilizan un material con un área de superficie muy alta llamada adsorbente para capturar contaminantes gaseosos. Se pueden usar dos procesos adsorbentes principales para eliminar los contaminantes gaseosos: un proceso físico conocido como adsorción y una reacción química llamada quimisorción. Ambos tipos de medios pueden

probarse utilizando la Norma ANSI/ASHRAE 145.1 (ASHRAE 2015c).

La adsorción resulta de la atracción física de las moléculas de gas o vapor a una superficie. Todos los adsorbentes tienen capacidades limitadas y, por lo tanto, requieren un mantenimiento frecuente. Un adsorbente generalmente adsorberá moléculas por las que tenga mayor afinidad y permitirá que otras moléculas permanezcan en la corriente de aire. La adsorción se produce más fácilmente a temperaturas y humedad más bajas. Los sorbentes sólidos tales como carbón activado, gel de sílice, alúmina activada, zeolitas, polímeros sintéticos y minerales de arcilla porosa son útiles debido a su gran área de superficie interna, estabilidad y bajo costo.

El carbón activado es el adsorbente más común usado en los sistemas HVAC y los purificadores de aire portátiles para eliminar los contaminantes gaseosos. Tiene el potencial de eliminar la mayoría de los hidrocarburos, muchos aldehídos, ácidos orgánicos por adsorción y ozono por quimisorción. Sin embargo, el carbón activado no es especialmente eficaz contra los óxidos de azufre, sulfuro de hidrógeno, aldehídos de bajo peso molecular (por ejemplo, formaldehído), amoníaco y óxido de nitrógeno.

Los filtros de medios adsorbentes pueden tener una alta eficiencia de eliminación para muchos contaminantes gaseosos, pero también pueden tener una eficiencia de eliminación diferente para diferentes gases en diferentes concentraciones (Kim et al. 2012). Por ejemplo, las pruebas realizadas en EPA midieron las isothermas de adsorción para tres COV en concentraciones de 100 partes por billón (ppb) a 200 ppb utilizando tres muestras de carbón activado. La profundidad del lecho necesaria para eliminar los compuestos se estimó asumiendo una concentración de 150 ppb en el aire, una

concentración de salida de 50 ppb y un caudal de 100 cfm a través de un filtro de 2 pies por 2 pies. Los resultados del estudio sugieren que el avance de estos químicos se produciría rápidamente en los filtros de carbono de 6 pulgadas de profundidad utilizados para el control de olores (Ramanathan et al. 1988). Por lo tanto, cuanto más gruesos sean los medios, más eficiente será el filtro durante largos períodos de tiempo.

Los medios adsorbentes también se pueden impregnar en capas delgadas en medios de filtración de aire fibrosos para eliminar gases y partículas. Por ejemplo, un estudio de los efectos de varias tecnologías de limpieza del aire en la percepción sensorial de sujetos humanos demostró que un filtro electret impregnado con sorbente de carbono recibió las mejores calificaciones con respecto a la fuerza del olor, la irritación nasal, la irritación ocular y la aceptación general del aire. (Shaughnessy et al. 1994). Sin embargo, tales capas finas pueden saturarse rápidamente y el filtro puede convertirse en una fuente de contaminantes previamente adsorbidos (Miller et al. 1991). La adsorción de contaminantes gaseosos a la mayoría de los medios adsorbentes no genera ningún subproducto químico, pero los filtros de los medios adsorbentes requieren un reemplazo o regeneración regulares para restaurar los sitios de sorbentes y evitar el avance. Los filtros de fase gaseosa que contienen sorbentes generalmente deben ubicarse corriente abajo de los filtros de aire de partículas. El filtro de aire reduce la cantidad de PM que llega al adsorbente, y el adsorbente recoge los vapores que pueden generarse a partir de partículas líquidas que se acumulan en el filtro de partículas.

La quimisorción ocurre cuando las moléculas de gas o vapor reaccionan químicamente con el material adsorbente o con agentes reactivos

impregnados en el adsorbente. Estos impregnados reaccionan con los gases y forman compuestos químicos estables que se unen a los medios como sales orgánicas o inorgánicas, o se descomponen y liberan en el aire como dióxido de carbono, vapor de agua o algún material adsorbido más fácilmente por otros adsorbentes.

El comportamiento de un filtro sorbente depende de muchos factores que pueden afectar la eliminación de gases contaminantes:

- Velocidad y velocidad del flujo de aire a través del sorbente.
- Concentración de contaminantes.
- Presencia de otros contaminantes gaseosos.
- Superficie total disponible del sorbente (Algunas técnicas de fabricación pueden reducir significativamente la superficie total de un filtro zona.)
- Características físicas y químicas de la contaminantes y el sorbente (como el peso, polaridad, tamaño de poro, forma, volumen y la tipo y cantidad de impregnación química)
- Caída de presión
- Eficiencia de remoción y capacidad de remoción.
- Temperatura y humedad relativa de la corriente de aire

La oxidación fotocatalítica (PCO)

Los purificadores de aire PCO utilizan un medio de alta área de superficie cubierto con un catalizador como el dióxido de titanio para adsorber contaminantes gaseosos (Huang et al. 2016; Mo et al. 2009; Wang et al. 2007; Zhong and Haghghat 2015). Cuando el fotocatalizador se irradia con luz UV, se produce una reacción fotoquímica y se forman radicales hidroxilo en la superficie del medio. Los radicales hidroxilo

oxidan los contaminantes gaseosos adsorbidos en la superficie del catalizador. Esta reacción, llamada PCO, convierte los contaminantes orgánicos en (idealmente) dióxido de carbono y agua.

Los purificadores de aire de PCO pueden transformar una amplia gama de contaminantes gaseosos. Sin embargo, los purificadores de aire de PCO muchas veces son ineficaces para transformar completamente los contaminantes gaseosos en el aire interior (Henschel 1998; Tompkins et al. 2005a, b) y también se sabe que generan subproductos dañinos como el formaldehído, el acetaldehído, el dióxido de nitrógeno y el monóxido de carbono (Hodgson et al. 2007). Los purificadores de aire de PCO también pueden generar ozono cuando se usan con una lámpara UV-C que carece de un revestimiento para inhibir la generación de ozono. Por lo tanto, algunos dispositivos de limpieza de aire de PCO utilizan filtros de aire de medios adsorbentes que pueden absorber algunos de los subproductos generados. Hay pocas investigaciones de campo para validar el rendimiento de los filtros de aire de PCO, y los estudios de laboratorio demuestran una gran variabilidad y, frecuentemente, una eficiencia de eliminación relativamente baja para muchos gases comunes en interiores. Por ejemplo, un estudio informó que los dispositivos de PCO instalados en filtros de aire portátiles no eliminaron ninguno de los COV de prueba presentes en las bajas concentraciones que normalmente se encuentran en el aire interior (Chen et al. 2005). Este estudio comparó las eficiencias de eliminación de COV de 15 purificadores de aire que utilizan diferentes tipos de tecnología. Se usó una mezcla de 16 COV que comúnmente se encuentra en interiores. El informe indicó que los dispositivos de PCO estudiados podrían no funcionar como se anuncia.

La utilidad de los purificadores de aire de PCO depende de la cantidad de catalizador, la cantidad de tiempo de contacto entre los contaminantes

gaseosos y el catalizador, y la cantidad de luz UV que se suministra a la superficie del catalizador. Si alguno de estos factores no se aborda en el diseño del dispositivo, un purificador de aire de PCO puede no destruir completamente los contaminantes y, en cambio, producir nuevos contaminantes en el interior, incluidos los irritantes. La PCO de ciertos COV puede crear subproductos que son contaminantes de interiores si los parámetros de diseño del sistema y la composición de metal catalizador no coinciden con el compuesto objetivo de descomposición, particularmente en presencia de múltiples compuestos reactivos que se encuentran comúnmente en entornos residenciales. Un estudio informó que no se formaron subproductos detectables durante el PCO de 17 COV que utilizan dióxido de titanio en las condiciones experimentales (Henschel 1998). Sin embargo, dos estudios sobre la degradación de cuatro COV clorados encontraron subproductos que incluyen fosgeno y cloruros (Alberci et al. 1998; Blake et al. 1993). Además, la PCO del tricloroetileno en el aire usando dióxido de titanio como catalizador produjo como subproductos monóxido de carbono, fosgeno, dióxido de carbono, cloruro de hidrógeno y cloro. Sin embargo, estos estudios no informaron la concentración de compuestos precursores clorados o las concentraciones de fosgeno formadas.

Varios otros estudios también han explorado los siguientes aspectos de los purificadores de PCO, a menudo con resultados mixtos y sugerencias para futuras investigaciones:

- ¿Cómo afectan la intensidad de la luz UV y el tiempo de residencia al rendimiento de PCO (Tompkins et al. 2005a)?
- ¿Cómo afecta el rendimiento de PCO la presencia de otros compuestos como el tolueno, el benceno, el etanol o los siloxanos (Tompkins et al. 2005a, b; Turchi et al. 1995; Zorn 2003)?

- ¿Cómo afecta la temperatura de reacción o el contenido de vapor de agua al rendimiento de la PCO (Zorn et al. 1999)?
- ¿Cómo se puede diseñar mejor los sistemas de PCO para optimizar el rendimiento (Destailats et al. 2012)?

Una revisión de la literatura sugiere que se necesita más investigación para avanzar en la PCO como una tecnología efectiva para eliminar los bajos niveles de contaminantes gaseosos del aire interior de las residencias (Chen et al. 2005; Tompkins et al. 2005 a, b). **La eficacia de los filtros de aire de PCO vendidos para su uso en hogares sigue sin documentarse.** Y hasta la fecha, no existe un método de ensayo estándar para comparar y evaluar la eficacia de los limpiadores de PCO instalados en sistemas residenciales de HVAC o purificadores de aire portátiles.

Plasma

Los purificadores de aire de plasma aplican una descarga de alto voltaje para ionizar los gases entrantes, rompiendo sus enlaces químicos y alterándolos químicamente (Bahri y Haghghat 2014). Los purificadores de aire de plasma térmicos generan una llama de plasma de alta temperatura con alto voltaje y alta corriente. Los purificadores de aire de plasma no térmicos aceleran los electrones para generar iones y radicales reactivos, que convierten los compuestos por reacciones de oxidación. Según las pruebas de laboratorio controladas principalmente, los purificadores de aire por plasma pueden tener una alta eficiencia de eliminación de algunos gases y partículas, y también pueden matar o desactivar los microorganismos suspendidos en el aire. Sin embargo, se sabe que se forman varios subproductos dañinos, que incluyen partículas, ozono, monóxido de carbono y formaldehído (Chen et al. 2009; Van Durme et al. 2009). Además, el plasma emitido directamente al aire interior contiene ozono y otras especies reactivas

de oxígeno, como radicales hidroxilo, superóxidos y peróxido de hidrógeno. Los purificadores de aire por plasma a veces se combinan con otras tecnologías de limpieza del aire, como PCO o medios adsorbentes, pero existe muy poca información sobre el rendimiento de estos sistemas en entornos interiores reales.

Generadores de ozono

Los generadores de ozono que se venden como purificadores de aire no deben usarse en espacios ocupados.

Los generadores de ozono que se venden como purificadores de aire, que generalmente están diseñados para controlar los olores, usan lámparas UV o descargas eléctricas para producir intencionalmente ozono. El ozono reacciona con los contaminantes químicos para transformarlos en otros compuestos en altas concentraciones y puede matar o desactivar los contaminantes biológicos.

Sin embargo, el ozono es un potente irritante de los pulmones. Y como el ozono reacciona con los contaminantes químicos, puede producir subproductos dañinos (Shaughnessy y Sextro 2006; U.S. EPA 2014; Wechsler 2006). Si las concentraciones de ozono se mantienen por debajo de los estándares de salud pública, tiene poco potencial para eliminar los contaminantes del aire interior. Sin embargo, incluso en concentraciones por debajo de los estándares de salud pública, el ozono reacciona con sustancias químicas emitidas por fuentes internas comunes como productos de limpieza para el hogar, ambientadores, desodorantes, ciertas pinturas, pulimentos, pisos de madera, alfombras y linóleo. Las reacciones químicas producen subproductos irritantes y corrosivos que pueden causar efectos adversos para la salud y pueden dañar los materiales de construcción, los muebles y el cableado. Los subproductos de la reacción al ozono que pueden resultar incluyen partículas ultrafinas, formaldehído,

cetonas y ácidos orgánicos (Destailats et al. 2006; Sarwar et al. 2003; Waring 2014; Wechsler 2000; Wechsler and Shields 1999). No use generadores de ozono vendidos como purificadores de aire en espacios ocupados. **Ninguna agencia federal ha aprobado generadores de ozono para su uso en espacios ocupados.**

Los generadores de ozono vendidos como purificadores de aire y comercializados como unidades montadas en ductos o portátiles utilizan luz UV o **descarga de corona** para producir ozono, que se dispersa por un ventilador en espacios ocupados (U.S. EPA 2014). La ley federal de pesticidas requiere que los fabricantes de generadores de ozono incluyan un número de establecimiento de la EPA en el empaque del producto. Este número simplemente identifica la instalación que fabricó el producto. La presencia de este número en el empaque de un producto no implica que la EPA lo respalde, ni tampoco implica que la EPA haya encontrado que el producto sea seguro o efectivo.

Puede encontrar más información sobre los generadores de ozono vendidos como purificadores de aire en: www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/ozone-generators-are-sold-air-cleaners.

Consideraciones prácticas sobre el uso de purificadores de aire para eliminar gases

Dado que existen muchos dispositivos diferentes de filtración de aire en fase gaseosa, es difícil comparar y evaluar la eficacia de los filtros de fase gaseosa instalados. ASHRAE ha desarrollado la Norma 145.2 como un método estándar para evaluar la eficacia de los dispositivos de filtración de fase gaseosa instalados en los conductos de los sistemas HVAC, pero en este momento no se utiliza ampliamente (Shaughnessy y Sextro 2006; U.S. EPA 2014; Wechsler 2006).

Los filtros de fase gaseosa son mucho menos comunes que los dispositivos de limpieza de

aire con partículas en los hogares porque en la actualidad, un sistema de filtración de fase gaseosa diseñado y construido adecuadamente es demasiado grande para un sistema residencial de HVAC o un filtro de aire portátil. Otros factores que pueden contribuir al uso menos frecuente de los filtros de fase gaseosa en los sistemas HVAC domésticos son la vida útil limitada de los filtros, el hecho de que el material absorbente se debe dirigir a contaminantes específicos, el precio de compra de los filtros y los costos de adaptarlos a aplicaciones residenciales, cuando sea posible, y de operar una vez que se hayan instalado.

Algunos filtros de fase gaseosa pueden eliminar, al menos temporalmente, una porción de los contaminantes gaseosos en el aire interior. Si bien algunos filtros de aire en la fase gaseosa—si es que están diseñados, instalados, usados y mantenidos correctamente—pueden eliminar de manera efectiva contaminantes específicos del aire interior, no se espera que ninguno elimine adecuadamente todos los contaminantes gaseosos en una casa típica. Por ejemplo, el monóxido de carbono no se captura fácilmente por adsorción o quimisorción (Shaughnessy et al. 1994).

Debido a su diseño compacto, los filtros de partículas de aire que usan medios impregnados para la eliminación de contaminantes gaseosos adicionales están disponibles para sistemas residenciales de HVAC y purificadores de aire portátiles. Usan partículas absorbentes de carbono, permanganato, alúmina o zeolita incorporadas en medios de filtración de material fibroso. Tales filtros generalmente varían de 1/8 de pulgada a 2 pulgadas de espesor. Proporcionan una combinación de partículas y filtración en fase gaseosa con un aumento menor en la caída de presión a través del filtro. Su uso en un sistema HVAC existente no requiere modificaciones extensas o costosas al sistema. Sin embargo, su vida útil varía según las concentraciones

de contaminación en interiores y el tiempo de exposición. La penetración de los contaminantes en la habitación puede ocurrir muy rápidamente en la capa delgada impregnada con sorbentes, lo que resulta en una corta vida útil para el filtro, que debe reemplazarse con frecuencia. Por lo tanto, estos dispositivos generalmente tienen una eficacia limitada para eliminar los olores.

Eliminación del radón y su progenie

La EPA no recomienda la limpieza con aire para reducir los riesgos para la salud asociados con el radón y los productos de la descomposición del gas radón (conocido como progenie del radón). La Agencia recomienda el uso de tecnologías de control de fuente para evitar que el radón ingrese a las estructuras residenciales. La técnica de control de radón más efectiva es la despresurización activa del suelo (TEA) (U.S. EPA 2006). Un sistema ASD utiliza un ventilador eléctrico para minimizar la entrada de radón extrayendo aire desde debajo de la losa/piso y ventilándolo hacia el exterior por encima de la línea del techo del edificio. Un número limitado de estudios ha investigado la eficacia de los purificadores de aire para eliminar el radón y su progenie. Compararon las eficiencias de eliminación de varios purificadores de aire, incluidos los filtros de aire mecánicos, los ESP y los ionizadores equipados con ventiladores, y la reducción de riesgo que logran los purificadores de aire. Sin embargo, el grado de reducción del riesgo encontrado por estos estudios ha sido inconsistente.

SELECCIÓN Y USO DE UN LIMPIADOR DE AIRE PORTÁTIL

Los parámetros clave que influyen en la eficacia de los filtros de aire portátiles incluyen no solo la eficiencia de eliminación fraccionada para un contaminante en particular, sino también la tasa de flujo de aire a través del filtro de aire y la proximidad de la unidad al ocupante y a cualquier otra fuente de contaminantes. Un parámetro útil

para comprender la eficacia de los filtros de aire portátiles es el **CADR**. El CADR es una medida de la entrega de aire relativamente limpio de un filtro de aire portátil, expresado en cfm. Por ejemplo, un filtro de aire que tiene un CADR de 250 para partículas de polvo puede reducir los niveles de partículas de polvo a la misma concentración que se lograría al agregar 250 cfm de aire limpio al espacio. El CADR es el producto de la eficiencia de eliminación fraccionada para un contaminante particular y la velocidad del flujo de aire a través del filtro de aire. Cuanto más alto sea el CADR, más partículas eliminará el filtro de aire y mayor será el área que puede servir. Un CADR puede teóricamente medirse y calcularse para gases o partículas; sin embargo, las normas de ensayo actuales solo califican, y la mayoría de los fabricantes informan, CADR para la eliminación de partículas.

Considere un ejemplo que cuantifique la eficacia de un dispositivo de limpieza de aire para eliminar contaminantes de un espacio ocupado. El resultado depende de tres factores: su eficiencia fraccionaria, la cantidad de aire que se filtra y la ruta que sigue el aire limpio después de que abandona el filtro. Por ejemplo, un filtro puede eliminar el 99 por ciento del contaminante del aire que lo atraviesa (es decir, tiene una eficiencia del 99 por ciento). Sin embargo, si la tasa de flujo de aire a través del filtro es de solo 10 cfm en una habitación típica de aproximadamente 1,000 pies cúbicos (por ej., aproximadamente 10 pies por 12 pies por 8 pies), el filtro será relativamente inefectivo para eliminar contaminantes del aire (es decir, 10 veces menos efectivo que si la tasa de flujo de aire fuera de 100 cfm).

Capacidad de purificación del aire (CADR) para filtros de aire portátiles

Existe una norma voluntaria para comparar el rendimiento de los filtros de aire portátiles en una habitación en condiciones estables durante un

ensayo de laboratorio controlado: ANSI / AHAM AC-1-2015 (AHAM 2015). Fue desarrollado por la Asociación de Fabricantes de Electrodomésticos (AHAM), una asociación comercial voluntaria privada que establece normas, y está reconocido por el American National Standards Institute (ANSI). La norma compara la eficacia de los filtros de aire portátiles en una cámara de prueba de tamaño de habitación, según lo medido por el CADR. Además de desarrollar y mantener este método de ensayo estándar, AHAM tiene un programa de certificación de filtro de aire portátil. La organización enumera a los purificadores de aire certificados por AHAM y sus CADR en su sitio web en www.ahamdir.com/462-2/. El directorio en línea de AHAM de purificadores de aire portátiles certificados permite realizar búsquedas según las calificaciones CADR certificadas, el tamaño de las habitaciones, los fabricantes o los nombres de marcas sugeridos.

La clasificación AHAM CADR se basa en la eliminación de tres rangos de partículas de tamaño a medida que pasan a través del purificador de aire portátil. Estos rangos de tamaño abarcan una amplia gama de tipos y dimensiones de partículas reales que se superponen entre sí, pero corresponden a contaminantes suspendidos en el aire que son de interés potencial para los consumidores. Las partículas eliminadas para lograr el “aire limpio” al que se refiere el CADR se describen como polen (partículas de 5 a 11 μm), polvo (partículas de 0.5 a 3 μm) y humo de tabaco (partículas de 0.09 a 1 μm). Estos tres contaminantes se utilizan como ejemplos para representar partículas de tamaño grande, mediano y pequeño, respectivamente.

Nótese que aunque AHAM usa partículas de humo de tabaco para representar partículas más pequeñas en el aire, la limpieza del aire no es una forma efectiva de tratar el humo de tabaco

ambiental. Hay miles de compuestos químicos en partículas y gaseosos, incluidos muchos carcinógenos conocidos, en el humo del tabaco que no se pueden eliminar de manera efectiva mediante la limpieza con aire.

Además, considérese que el **CADR etiquetado en el empaque del producto es generalmente el CADR más alto que se puede lograr, lo que típicamente ocurre en la configuración de flujo de aire más alta**. Si bien las configuraciones de flujo de aire más bajas pueden tener una menor producción de ruido, es posible que no se conozca el CADR (podría ser considerablemente más bajo que el más alto anunciado y, por lo tanto, significativamente menos efectivo en la eliminación de contaminantes).

A pesar de sus diferencias, los CADR medidos para cada uno de los tres rangos de tamaño de partículas probados son típicamente similares entre sí para un filtro de aire específico. Por ejemplo, la Figura 9 muestra los CADR de más de 350 filtros de aire individuales probados por la norma AHAM e informados por AHAM: gbs-stage.intertek.com/gbsintegration-service/AirCleanerFullDir.pdf. La Figura 10 muestra el tamaño máximo de habitación recomendado por AHAM (en pies cuadrados) para cada filtro de aire que se muestra en la Figura 9 (también como se informa en el sitio web de AHAM).

En promedio, los CADR para el polen suelen ser aproximadamente un 5 por ciento más altos que los CADR en polvo, mientras que los CADR para el humo de tabaco son aproximadamente un 4 por ciento más bajos que los polvos en polvo. Por lo tanto, para comprender cómo un filtro de aire eliminará partículas pequeñas como las que componen $\text{PM}_{2.5}$, los CADR de humo de tabaco deben utilizarse como la estimación más conservadora.

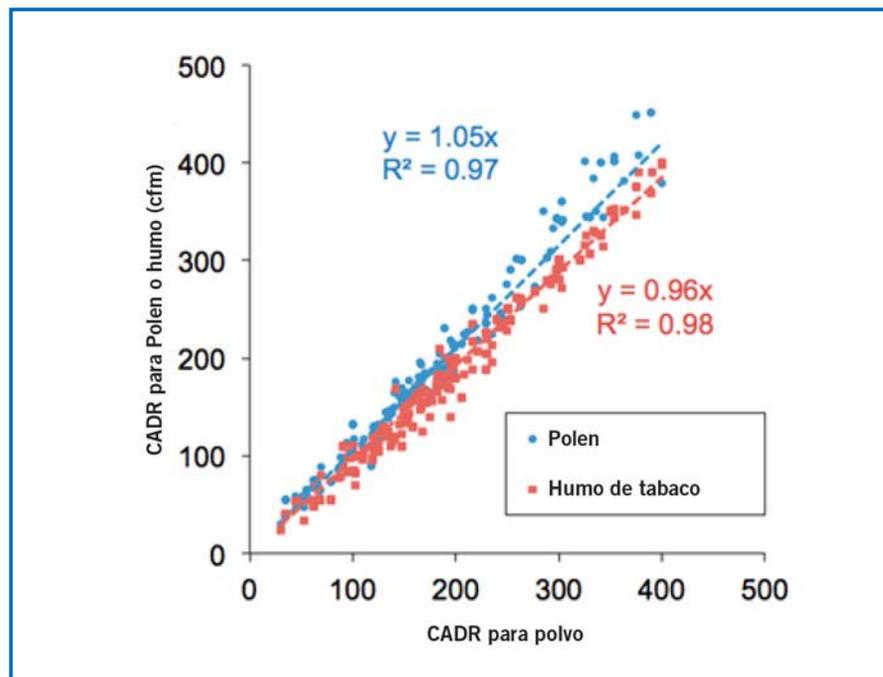


Figura 9. Comparación de CADR para partículas de polen, polvo y humo de tabaco en más de 350 purificadores de aire ensayados y reportados por AHAM: gbs-stage.intertek.com/gbsintegration-service/AirCleanerFullDir.pdf.

El método de prueba ANSI / AHAM AC-1 también proporciona una manera de recomendar para qué tamaño de habitación se debe especificar un filtro de aire. La recomendación de tamaño de la habitación se calcula en función de una reducción del 80 por ciento en las concentraciones de partículas en estado estable en los tres rangos de tamaño de la prueba AHAM. Este nivel de eficacia supone un caudal de aire limpio que es de cuatro a cinco veces el volumen de las dimensiones de la sala utilizadas durante la prueba. Dicho de otra manera, si la unidad se coloca en un espacio más grande que el especificado por su clasificación de CADR, se puede esperar que no alcance una reducción del 80 por ciento, y si se coloca en un espacio más pequeño, la unidad puede lograr una mayor reducción del porcentaje (asumiendo en todos los casos que la generación de partículas se mantiene a un ritmo constante).

Basándose en la eliminación de partículas de humo de tabaco solo, la Tabla 2 resume los ajustes lineales a los datos en la Figura 10 para aproximar el CADR mínimo que se requeriría para varios tamaños de habitación desde 100 a 600 pies cuadrados. Como ejemplos, las aproximaciones resultantes del tamaño máximo de la habitación que serían más apropiadas para un filtro de aire portátil CADR de 20 cfm, 150 cfm y 300 cfm son respectivamente 30 pies, 225 y 450 pies cuadrados. Para referencia, 30 pies cuadrados serían equivalentes a un espacio de 5 pies por 6 pies; 225 pies cuadrados equivaldrían a una sala de 15 pies por 15 pies; y 450 pies cuadrados equivaldrían a una habitación de 25 pies por 18 pies en una casa típica de un piso.

Muchos de los filtros de aire portátiles que AHAM ha probado tienen clasificaciones de CADR de moderadas a altas para partículas

Tabla 2. Tamaños de Purificadores de Aire Portátiles para un 80% de Reducción en Concentraciones de Partículas en Estado Estacionario del Aire Ambiental

| | | | | | | |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Área del cuarto (pies cuadrados) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| CADR mínimo (cfm) | 65 | 130 | 195 | 260 | 325 | 390 |

pequeñas (Shaughnessy y Sextro 2006). **También es importante tener en cuenta que la tasa de eliminación de un filtro de aire portátil también compite con otros procesos de eliminación que ocurren en el espacio, incluida el depósito de partículas en las superficies, la absorción de gases, las reacciones químicas del aire interior y el intercambio de aire exterior. Por lo tanto, mientras que un filtro de aire portátil puede no alcanzar su CADR nominal en todas las circunstancias, el valor de CADR permite comparaciones entre filtros de aire portátiles.**

Además de evaluar los CADR para los rangos de tamaño de partícula involucrados en la norma de

ensayo AHAM, los estudios hasta la fecha también han evaluado el desempeño de los purificadores de aire portátiles en la eliminación de partículas de humo de tabaco; partículas de escape de diesel; partículas más grandes suspendidas en el aire, incluidas las que contienen alérgenos de gatos, perros y ácaros del polvo; y partículas finas y ultrafinas (Bascom et al. 1996; Battistoni y Fava 1993; Consumers Union 2003; Custovic et al. 1998; De Blay et al. 1991; Green et al. 1999; Institute of Medicine 2000; Molgaard et al. 2014; Ongwandee y Kruewan 2013; Peck et al. 2016; Sultan et al. 2011; Van der Heide et al. 1999; Waring et al. 2008; Wood et al. 1998). Estos estudios generalmente han demostrado que

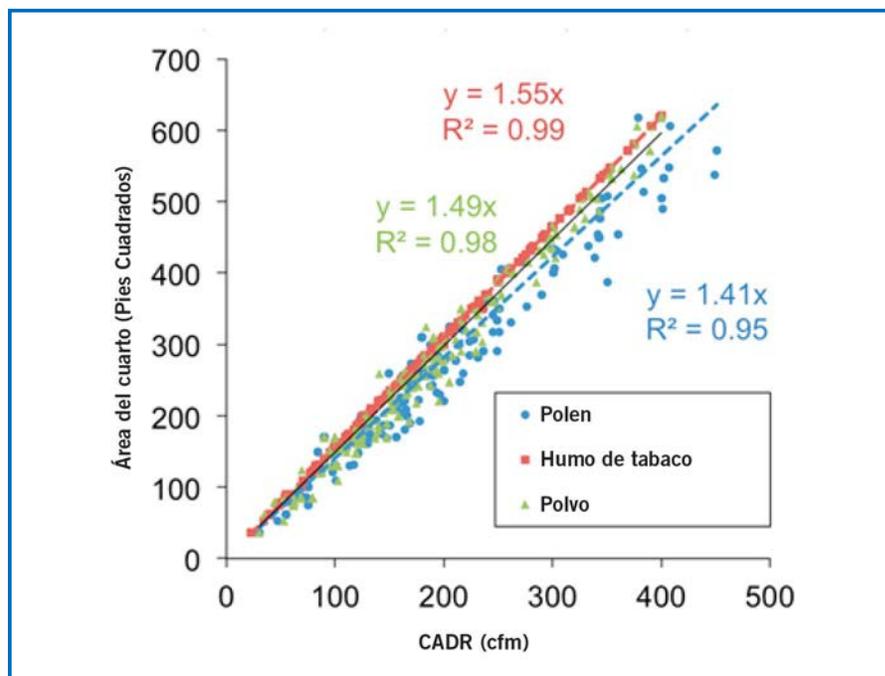


Figura 10. Tamaño máximo del cuarto (en pies cuadrados) para el cual cada purificador de aire de la Figura 9 es más apropiado (para cada categoría por tamaño de partícula ensayada) como reportados en el sitio web de la AHAM: ahamverifide.org/ahams-air-filtration-standards/.

los CADR para partículas finas y ultrafinas varían desde menos de aproximadamente 20 cfm para ionizadores y purificadores de aire portátiles PCO hasta aproximadamente 150 y 300 cfm para muchos purificadores de aire portátiles HEPA y ESP, dependiendo del tamaño del dispositivo.

Ruido de purificadores de aire portátiles

Algunos ensayos clínicos controlados que involucran el uso de purificadores de aire portátiles han observado que las unidades portátiles de limpieza de aire se usaron con menos frecuencia a lo largo del tiempo. Menos horas de operación reduce su eficacia y, por lo tanto, su efecto potencialmente positivo en la calidad del aire interior y los resultados de salud. Un estudio señaló específicamente que los ocupantes informaron el ruido excesivo como la razón para apagar los purificadores de aire por la noche (Sulser et al. 2009). Otros ensayos clínicos controlados especularon que el ruido de funcionamiento era una razón por la que los purificadores de aire estaban apagados durante las horas de sueño (Batterman et al. 2012, 2013). El hecho de que el ruido sea un factor en el comportamiento del consumidor es consistente con la observación de que el empaque de los consumidores de purificadores de aire portátiles a menudo incluye descriptores como “silencioso”. Los estudios de intervención no indican qué niveles de ruido estimularían más horas de uso. Sin embargo, a partir de 2017, el ruido operativo cuantificado no es un factor en las clasificaciones de rendimiento de las clasificaciones de filtros de aire portátiles en los Estados Unidos, ni los valores de ruido medidos durante las pruebas de rendimiento comúnmente disponibles para los consumidores en el empaque del producto. La cuantificación del ruido de funcionamiento de los purificadores de aire podría ser una base útil para la elección de consumidores mejor informados.

Consideraciones prácticas para el uso de filtros de aire portátiles

Las concentraciones de partículas en interiores no son constantes a lo largo del tiempo.

Algunos contaminantes de interiores se generan periódicamente a partir de fuentes como el pasatiempo y los materiales para manualidades o la cocción de alimentos, y las altas concentraciones pueden continuar por largos períodos de tiempo incluso después de que la fuente se haya ido. Otros pueden infiltrarse en fuentes externas episódicas, como las emisiones de incendios forestales (para obtener recomendaciones sobre la limpieza del aire para reducir la exposición al humo de los incendios forestales dentro de las casas, consulte el documento de la EPA del 2019 *Wildfire Smoke: A Guide for Public Health Officials* [“Humo de Incendios Forestales: una guía para funcionarios de salud pública”], disponible en línea en www3.epa.gov/airnow/wildfire-smoke/wildfire-smoke-guide-revised-2019.pdf). Por lo tanto, un filtro de aire portátil tendría que estar funcionando durante y después de estas fuentes de contaminantes intermitentes para tener un efecto significativo en las concentraciones y exposiciones de contaminantes.

La colocación de cualquier filtro de aire portátil afectará su rendimiento. Por ejemplo, si hay una fuente de contaminantes específica e identificable, como aparatos de oficina u otras fuentes puntuales, la unidad debe colocarse de manera que su consumo esté cerca de esa fuente. Si no hay una fuente específica, el filtro de aire debe colocarse donde dirigirá el aire limpio hacia la zona de respiración de los ocupantes.

El filtro de aire no debe situarse donde paredes, muebles, cortinas y otras obstrucciones bloqueen la entrada y la salida. Las instrucciones del fabricante pueden indicar que el filtro de aire debe

colocarse a cierta distancia de cualquier objeto que pueda obstruir el flujo de aire. Además, un filtro de aire portátil será mucho más efectivo para una habitación específica cuando se cierran las puertas y ventanas exteriores de una habitación.

Sustituir regularmente los medios de filtración y/o la limpieza son esenciales para asegurar su rendimiento. Siga las instrucciones del fabricante para el sustituir y/o limpiar el filtro.

Algunos purificadores de aire portátiles que se venden a los consumidores tienen la certificación ENERGY STAR®. Al obtener la certificación ENERGY STAR®, un producto cumple con las estrictas pautas de eficiencia energética establecidas por la EPA y el Departamento de Energía de los E.U.A. La etiqueta de exención de responsabilidad de ENERGY STAR®, que incluye la siguiente declaración, se encuentra en el empaque del producto de los purificadores de aire con calificación ENERGY STAR®: “Este producto obtuvo la calificación de ENERGY STAR® al cumplir con las estrictas pautas de eficiencia energética establecidas por la EPA de los E.U.A. La EPA no respalda ninguna afirmación de un fabricante sobre el aire interior más saludable por el uso de este producto”. Para obtener información más detallada sobre los costos de energía aproximados de operar los purificadores de aire portátiles, consulte la Tabla 3.

La información sobre los purificadores de aire portátiles está disponible en la revista/ sitio web de *Consumer Reports* [Informes para el consumidor]. La organización Consumers Union es una organización sin fines de lucro que proporciona revisiones y calificaciones de productos. Los detalles de los métodos de prueba utilizados por la Consumers Union para evaluar el rendimiento de dispositivos de limpieza del aire

no están disponibles públicamente. La Consumers Union clasifica a los purificadores de aire según una variedad de criterios, incluyendo el ruido.

Se debe tener precaución al cambiar y limpiar de los medios de filtración y otros componentes de los purificadores de aire. Durante la limpieza o sustitución de los purificadores de aire, se debe hacer un esfuerzo para asegurar que los contaminantes no se vuelvan a emitir al aire y no entren en contacto con la piel. Para minimizar las exposiciones, deben evitarse movimientos excesivos o corrientes de aire cuando se cambian los filtros. El uso de un respirador N-95 (como los que se venden para proyectos de mejoras para el hogar) y los guantes puede ayudar a proporcionar protección adicional durante la limpieza o sustitución del filtro. Los filtros usados deben colocarse en bolsas de plástico selladas o contenedores para su eliminación.

El ruido también puede ser una consideración al seleccionar un purificador de aire portátil que contenga un ventilador. Los purificadores de aire portátiles que no tienen ventiladores suelen ser mucho menos efectivos que las unidades que los tienen. En las pruebas realizadas por la Consumers Union, los purificadores de aire portátiles más grandes fueron los más ruidosos en su configuración de alta velocidad más efectiva (Consumers Union 2002). Estudios recientes revisados por pares también han confirmado este mismo hallazgo (Peck et al. 2016). Sin embargo, algunos se desempeñaron de manera más silenciosa a baja velocidad que muchos limpiadores más pequeños en alta. Se encontró que algunas unidades portátiles más grandes que operan a baja velocidad son lo suficientemente silenciosas para la mayoría de los hogares (Consumers Union 2003).

SELECCIONAR Y UTILIZAR UN FILTRO DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN U OTRO PURIFICADOR DE AIRE INSTALADO EN DUCTOS

Además de las métricas de eficiencia de remoción fraccionada para filtros de sistemas de calefacción como MERV, MPR, FPR o HEPA, la eficacia de los filtros de sistemas de calefacción y los purificadores de aire instalados en ductos está influenciada por varios otros parámetros clave y consideraciones prácticas de diseño y operación.

Consideraciones prácticas para el uso de purificadores de aire instalados en ductos

La eliminación de contaminantes está limitada frecuentemente por la operación del sistema. Si bien las calificaciones de eficiencia de eliminación fraccionada son un indicador importante del rendimiento potencial, la reducción de las concentraciones de contaminantes es una función importante de la eficacia del sistema. La eficacia de un filtro en el ducto u otro filtro de aire es una función de muchos parámetros además de la eficiencia de extracción fraccionada del filtro o del purificador de aire, incluida la tasa de flujo de aire a través del sistema en relación con el tamaño del espacio y el sistema HVAC tiempo de ejecución. En la mayoría de las casas, los sistemas centrales de calefacción y refrigeración por aire forzado solo funcionan para satisfacer las necesidades de calefacción y refrigeración. Aunque hasta la fecha son bastante limitados, los estudios experimentales han demostrado que los tiempos de ejecución de HVAC centrales típicos promedian menos del 20 al 25 por ciento en la mayoría de los tipos de edificios residenciales en la mayoría de las zonas climáticas (James et al. 1997). Además, en algunos lugares, como donde no se necesita el aire acondicionado o donde el aire acondicionado

es provisto por los aires acondicionados instalados en ventanas, es posible que los sistemas centrales de HVAC no funcionen durante muchos meses del año. Los tiempos de funcionamiento bajos del sistema pueden limitar en gran medida la eficacia de los purificadores de aire instalados en ductos simplemente porque no pasa aire a través de éstos el tiempo suficiente para producir reducciones sustanciales en las concentraciones de contaminantes en interiores (Stephens 2015; Zhao et al. 2015). Debido a los bajos tiempos de ejecución del sistema, los datos experimentales y las predicciones teóricas indican que para la eliminación de partículas, es probable que los filtros de sistemas de calefacción de eficacia media a alta, como algunos filtros MERV 12 y la mayoría de los filtros MERV 13 a 16, sean casi tan efectivos como los filtros HEPA en la reducción de las concentraciones de la mayoría de los tamaños de partículas interiores, incluidas las relacionadas con los efectos sobre la salud (Fisk et al. 2003; Zhao et al. 2015). La operación continua del ventilador HVAC mejorará la circulación del aire y la limpieza del aire, pero este modo de operación también aumenta el consumo de energía eléctrica y su costo (NAFA 2007). Para obtener información más detallada sobre los costos de energía aproximados de los sistemas HVAC operativos con purificadores de aire instalados en ductos y filtros, consulte la Tabla 3.

No todos los ventiladores del sistema HVAC pueden acomodar filtros de alta eficiencia sin afectar el rendimiento del sistema. Es posible que los sistemas residenciales de HVAC residenciales no tengan suficiente capacidad de ventilador o motor para acomodar filtros de caída de presión más altos sin reducir el flujo de aire al punto donde se pierde la capacidad de enfriamiento o calentamiento o se sacrifica una buena mezcla de aire. Estas deficiencias

pueden llevar a un mayor riesgo de falla de los componentes y/o problemas de comodidad en el espacio (Proctor 2012; Proctor et al. 2011; Walker et al. 2013). Por lo tanto, en las instalaciones nuevas, la información del fabricante de HVAC debe verificarse para determinar si es factible utilizar filtros de alta eficiencia (y alta caída de presión), dado el diseño, tamaño y velocidad previstos de los sistemas de ducto de retorno y suministro. En los hogares existentes, se puede medir el rendimiento de todo el sistema instalado con respecto al caudal de aire en comparación con el flujo de aire del equipo y las capacidades de presión para garantizar que el sistema pueda adaptarse a la mayor caída de presión impuesta al agregar un filtro de aire de alta eficiencia; esto debe ser realizado por un profesional. La simple instalación de un filtro de alta eficiencia no es garantía de que funcionará según lo previsto. Las preocupaciones sobre el rendimiento del sistema HVAC se reducen o eliminan mediante el uso de filtros de alta eficiencia con baja resistencia al flujo de aire, debido al plisado extenso de los medios

de filtración, el aumento del grosor del filtro y el uso de medios cargados electrostáticamente. Tales filtros están cada vez más disponibles.

Los dispositivos de purificación del aire instalados en ductos deben instalarse de manera que se evite el flujo de aire de derivación.

Los filtros de aire deben instalarse de modo que la flecha direccional impresa en el lado del filtro apunte en la dirección del flujo de aire dentro del sistema. Los marcos de filtro diseñados o instalados incorrectamente pueden provocar un flujo de aire de derivación, lo que disminuye significativamente la eficacia del filtro. El flujo de aire de derivación también puede resultar de una fuga en el conducto de retorno. Si el aire de espacios no acondicionados ingresa por el conducto de retorno, puede eludir el filtro, si el filtro se instala en una rejilla de retorno, en lugar de en la base de la unidad de manejo del aire. Se recomienda que los ductos de HVAC estén bien sellados para las instalaciones de la rejilla de retorno. Los filtros de alta eficiencia requieren marcos bien sellados para evitar fugas.

Tabla 3. Aproximaciones del Uso Anual de Electricidad y los Costos de Electricidad para Operar Diferentes Purificadores de Aire Portátiles Basadas en Mediciones de Consumo de Energía Reportadas en las Fuentes de información disponibles y Supuestos para el Tiempo de Operación al 20, 50 ó 100 Por Ciento

| Tipo de purificador de aire | Fuente | Consumo de energía (W) | Tasa de flujo del aire (cfm) | Uso de electricidad anual (kWh) | | | Costos anuales de electricidad | | |
|-----------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|
| | | | | Tiempos de operación supuestos | | | | | |
| | | | | 20% | 50% | 100% | 20% | 50% | 100% |
| ESP | Waring et al. (2008) | 102 | 500 | 179 | 447 | 894 | \$21 | \$54 | \$107 |
| HEPA 1 | | 206 | 182 | 361 | 902 | 1,805 | \$43 | \$108 | \$217 |
| HEPA 2 | | 103 | 340 | 180 | 451 | 902 | \$22 | \$54 | \$108 |
| Generador de iones 1 | | 8 | 36 | 14 | 35 | 70 | \$2 | \$4 | \$8 |
| Generador de iones 2 | | 5 | <18 | 9 | 22 | 44 | \$1 | \$3 | \$5 |
| HEPA 1 | Sultan et al. (2011) | 167 | 267 | 293 | 731 | 1,463 | \$35 | \$88 | \$176 |
| HEPA 2 | | 226 | 571 | 396 | 990 | 1,980 | \$48 | \$119 | \$238 |
| Electret fibroso | | 135 | 463 | 237 | 591 | 1,183 | \$28 | \$71 | \$142 |
| HEPA 3 + carbon activado | | 98 | 146 | 172 | 429 | 858 | \$21 | \$52 | \$103 |
| ESP | | 98 | 473 | 172 | 429 | 858 | \$21 | \$52 | \$103 |
| Generador de iones 1 | | 46 | 112 | 81 | 201 | 403 | \$10 | \$24 | \$48 |
| Generador de iones 2 | | 45 | 382 | 79 | 197 | 394 | \$9 | \$24 | \$47 |
| Plasma + HEPA | | 110 | 344 | 193 | 482 | 964 | \$23 | \$58 | \$116 |
| PCO 1 | | 444 | 913 | 778 | 1,945 | 3,889 | \$93 | \$233 | \$467 |
| PCO 2 | | 14 | 8 | 25 | 61 | 123 | \$3 | \$7 | \$15 |
| UVGI | | 16 | 12 | 28 | 70 | 140 | \$3 | \$8 | \$17 |

¹Suponiendo un costo de electricidad constante de \$0.12 / kWh.

Para los sistemas existentes, la instalación de un filtro HEPA de mayor eficiencia puede requerir modificaciones a los ductos existentes para permitir la instalación del filtro más grueso. Además, puede ser necesario un ventilador más potente para superar la mayor caída de presión. Los filtros de aire electrónicos y las lámparas UV deben tener una fuente de alimentación accesible y un indicador que muestre cuando el servicio eléctrico está apagado. La instalación de lámparas UV requiere la adición de orificios de acceso en el ducto, y los orificios deben sellarse correctamente para mantener la eficiencia de HVAC. Para evitar peligros eléctricos y mecánicos, asegúrese de que los dispositivos de limpieza de aire que requieren una fuente de alimentación eléctrica estén listados en el sitio web de Underwriters Laboratories (www.ul.com) o en otro laboratorio de ensayos de seguridad independiente.

Los dispositivos de purificación del aire instalados en ductos requieren acceso suficiente para la inspección durante su uso, reparación y mantenimiento. Los purificadores de aire instalados en ductos deben seleccionarse para que coincidan con las condiciones de operación, como el tipo de contaminante que se va a eliminar y la caída de presión permitida. Los filtros y sorbentes deben reemplazarse regularmente, de acuerdo con las especificaciones del fabricante. La eficiencia del filtro de aire electrónico disminuye a medida que las placas de recolección se cargan con partículas, por lo que las placas deben limpiarse, a veces con frecuencia, según lo requiera el fabricante. Las limpiezas deben programarse para que la unidad funcione a máxima eficiencia. Se debe prestar especial atención a la limpieza de los cables ionizantes de los purificadores de aire electrónicos diseñados para atacar contaminantes específicos.

Apague la unidad mientras realiza el servicio o la limpieza de los purificadores de aire instalados en ductos y los sistemas centrales de HVAC.

Durante la limpieza o el remplazo de los filtros o purificadores de aire, se debe hacer un esfuerzo para asegurar que los contaminantes no se vuelvan a emitir al aire y no entren en contacto con la piel. Para minimizar las exposiciones, deben evitarse movimientos excesivos o corrientes de aire cuando se retiran los filtros. El uso de un respirador N-95 y guantes puede ayudar a proporcionar protección adicional durante la limpieza o reemplazo del filtro. Los filtros usados deben colocarse en bolsas de plástico selladas u otros recipientes para su eliminación.

APROXIMACIONES DE LOS COSTOS DE ELECTRICIDAD OPERATIVOS DE LOS PURIFICADORES DE AIRE PORTÁTILES E INSTALADOS EN DUCTOS

El análisis detallado de los costos del ciclo de vida de todos los tipos de purificadores de aire portátiles e instalados en ductos y los sistemas descritos en este documento no se encuentran en la literatura, aunque la Tabla 3 proporciona aproximaciones de las operaciones. Los costos de electricidad de uso de varios purificadores de aire portátiles y en el conducto. Waring et al. (2008) y Sultan et al. (2011) informaron mediciones de consumo de energía eléctrica para varios tipos de purificadores de aire portátiles, incluidos los purificadores de aire HEPA (promedio de aproximadamente 160 vatios [W]), generadores de iones (promedio de aproximadamente 25 W), ESPs (promedio de aproximadamente 100 W), plasma (una unidad combinada con HEPA a aproximadamente 110 W), PCO (promedio de aproximadamente 229 W con un amplio rango) y UVGI (una unidad pequeña a 16 W). En general, las unidades con mayores tasas de flujo de aire

también tuvieron mayores consumos de energía y fueron filtros de aire más efectivos para eliminar partículas ultrafinas en comparación con las unidades con menores tasas de flujo de aire y menores consumos de energía. Estos purificadores de aire, consumos de energía y tasas de flujo de aire se resumen en la primera parte de la Tabla 3.

También se muestra en la Tabla 3 una aproximación del número de kilovatios-hora (kWh) y los costos anuales de electricidad requeridos para alimentar a los purificadores de aire portátiles seleccionados para 20, 50 y 100 por ciento de las horas del año, suponiendo un consumo constante de energía y un costo promedio de electricidad de \$0.12 USD [Dólares americanos] por kWh. Los costos de electricidad anuales estimados para el funcionamiento de estos purificadores de aire portátiles abarcan el 100 por ciento del tiempo, desde menos de \$10 USD por año para una unidad ionizadora pequeña a más de \$450 USD por año para una unidad de PCO grande. El promedio anual de los costos de electricidad para el funcionamiento de los purificadores de aire portátiles HEPA el 100% de las veces es poco menos de \$200 USD por año, con unidades individuales que van desde poco más de \$100 USD hasta casi \$250 USD por año.

A modo de comparación, el ventilador en una unidad central de manejo de aire en un sistema de HVAC residencial típico, que generalmente se mueve entre 500 y 2,000 cfm cuando está en funcionamiento, consume entre aproximadamente 250 y 600 W (con un promedio de aproximadamente 450 W) (Stephens et al. 2010). Ejecutar una unidad de manejo de aire promedio que consuma aproximadamente 450 W durante el 100 por ciento del año costaría aproximadamente \$475 USD, que es aproximadamente \$380 USD más alto que el costo de ejecutar la misma unidad

para un tiempo de ejecución fraccional típico de aproximadamente el 20 por ciento para satisfacer solo la calefacción y el enfriamiento necesidades (que es de aproximadamente \$95 USD). Aunque estas estimaciones de costos no consideran los costos de reemplazo del filtro, los costos de mantenimiento o los costos incrementales de los cambios en el uso de la energía HVAC (basado en otros aspectos, como los cambios en la caída de presión del filtro de aire a lo largo del tiempo, las tasas de flujo de aire del ventilador o los tiempos de funcionamiento del sistema de calefacción y refrigeración) (Fazli et al. 2015), por lo general, el costo de electricidad operacional de la mayoría de los filtros de aire portátiles probablemente será menor que el de los ventiladores de HVAC centrales durante el mismo período de tiempo. Tenga en cuenta que estas son aproximaciones y el consumo de energía de purificadores de aire, y unidades de manejo de aire específicos varía.

¿LA LIMPIEZA DE AIRE SERÁ CAPAZ DE REDUCIR LOS EFECTOS EN LA SALUD DE LOS CONTAMINANTES DEL AIRE INTERIOR?

En el año 2000, el Comité del Instituto de Medicina para la Evaluación del Asma y el Aire Interior de la Academia Nacional de Ciencias revisó la literatura sobre los efectos de los limpiadores de partículas de aire en los síntomas de alergia y asma y concluyó que: “Los resultados de los estudios experimentales existentes son inadecuados para saque conclusiones firmes con respecto a los beneficios de la limpieza del aire para personas asmáticas y alérgicas ... Los purificadores de aire son útiles en algunas situaciones para reducir los síntomas de alergia o asma, especialmente los síntomas estacionales, pero está claro que la limpieza del aire, como se aplica en los estudios, no es consistente y altamente eficaz para reducir los síntomas”

(Institute of Medicine 2000). Desde el año 2000, las tecnologías han avanzado y varios estudios adicionales han investigado aún más el impacto de los purificadores de aire portátiles en los resultados de salud o biomarcadores de los resultados de salud cardiovascular y respiratoria. Varios de estos estudios se resumieron originalmente en detalle en Fisk (2013).

Este documento incluye una versión modificada del resumen y una evaluación subjetiva de la solidez del diseño de ensayos clínicos controlados para purificadores de aire residencial y la salud, de Fisk (2013). Además, varios estudios más recientes también se han resumido. Solo se incluyeron en este documento los ensayos clínicos controlados que se centraron en purificadores de aire en residencias; los ensayos clínicos en edificios comerciales (Skulberg et al. 2005; Wargocki et al. 2008) se excluyeron debido a las diferencias en la naturaleza de las fuentes de contaminantes interiores y las tecnologías de sistemas HVAC en edificios comerciales.

Evidencia del impacto de los filtros de aire en las concentraciones de contaminantes en interiores

Varios estudios recientes han demostrado que el uso de filtros de aire portátiles con CADR de aproximadamente 100 a 300 cfm en salas y/o dormitorios puede reducir sustancialmente las concentraciones de PM en interiores y exteriores origen, a menudo reduciendo las concentraciones interiores de PM_{2.5} en alrededor del 50 por ciento en promedio (por ej., Allen et al. 2011; Barn et al. 2008; Bräuner et al. 2008; Butz et al. 2011; Chen et al. 2015; Cui et al. 2018; Kajbafzadeh et al. 2015; Karottki et al. 2013; Lanphear et al. 2011; Park et al. 2017; Shao et al. 2017; Weichenthal et al. 2013; Xu et al. 2010).

Menos estudios han investigado el impacto de los filtros de aire portátiles en las concentraciones de contaminantes gaseosos o los patrones de uso de

filtros de aire portátiles a lo largo del tiempo. Un estudio demostró que el uso de un filtro de aire HEPA portátil con un filtro de medios de carbón activado también redujo las concentraciones de dióxido de nitrógeno en interiores inmediatamente después del seguimiento, aunque las reducciones disminuyeron con el tiempo, probablemente cuando los ocupantes comenzaron a operar los filtros de aire con menos frecuencia (Paulin et al. 2014). El mismo tipo de comportamiento también se observó en otro estudio en el que la mayoría de las personas usaban sus purificadores de aire portátiles cuando los investigadores visitaban a menudo al principio del estudio, pero el uso disminuyó a solo alrededor de un tercio de los hogares después de que los investigadores dejaron de visitarlos (Batterman et al. 2012). Estos resultados confirman aún más la importancia de mantener y operar realmente cualquier tipo de dispositivo de limpieza de aire.

Algunos estudios experimentales también han demostrado que los filtros de aire de medios fibrosos HVAC centrales de mayor eficiencia, como MERV 13 o superior, pueden reducir las concentraciones de partículas en interiores (Héroux et al. 2010; Singer et al. 2016). Aunque siguen siendo limitados en número, tienden a confirmar varios estudios de modelos existentes que demuestran resultados predichos similares (Azimi et al. 2016; Brown et al. 2014; MacIntosh et al. 2010; Myatt et al. 2008; Zhao et al. 2015).

En general, las pruebas de campo y los estudios de simulación muestran que los purificadores de aire de alta eficiencia instalados en ductos, y [purificadores de aire] portátiles de alto CADR pueden reducir los niveles de partículas suspendidas en el aire y, en algunos casos, los contaminantes gaseosos en las casas. Los filtros de medios fibrosos de alta eficiencia (por ej., con alta clasificación MERV o HEPA) y los filtros de medios absorbentes de carbón activado generalmente han demostrado ser los más

efectivos, al mismo tiempo que tienen menos limitaciones o consecuencias adversas.

Evidencia de los impactos de los purificadores de aire en los resultados de salud y/o biomarcadores de resultados de salud

Los estudios que investigan el impacto de los purificadores de aire en los resultados de salud y / o biomarcadores de resultados de salud se dividen en dos categorías: (1) ensayos clínicos controlados de resultados de salud respiratoria en casas con sujetos con alergias o asma y (2) ensayos clínicos controlados de resultados de salud en casas, principalmente cardiovasculares, no dirigidos a sujetos con alergias o asma. El primer grupo de estudios se resume en la Tabla 4 y el segundo grupo de estudios se resume en la Tabla 5. Cada estudio también se resume con más detalle en una sección posterior al final de este documento.

Resumen de los impactos en los resultados de salud de la alergia y el asma

En la Tabla 4 se resume un total de ocho ensayos clínicos controlados que investigaron el impacto del uso de filtros de aire en los hogares sobre los resultados de la salud respiratoria y los cambios en los síntomas de alergia o asma en sujetos con alergia o asma. La Tabla 4 incluye cinco estudios informados en Fisk (2013), así como dos estudios adicionales publicados desde entonces y un estudio anterior que no se incluyó en Fisk (2013). Seis estudios investigaron filtros de partículas portátiles de alta eficiencia (típicamente HEPA), un estudio investigó una unidad de suministro de aire exterior de un dormitorio sin filtro, y un estudio investigó una unidad central de UVGI en el ducto. Los ocho estudios informaron mejoras estadísticamente significativas en al menos un punto final de salud, incluidos, entre otros, resultados objetivos y autoinformados, como el flujo espiratorio máximo, los marcadores de

inflamación bronquial, el uso de medicamentos o las puntuaciones de los síntomas. Sin embargo, las magnitudes de las mejoras fueron frecuentemente modestas y, por lo general, otros resultados de salud medidos no se vieron afectados o los cambios observados no fueron estadísticamente significativos. Los cambios en las concentraciones de contaminantes en interiores, cuando se midieron, fueron generalmente grandes y estadísticamente significativos para medidas tales como $PM_{2.5}$ o COV total (generalmente aproximadamente 50 por ciento de reducción en las concentraciones), pero no para alergias u otros recuentos microbianos. Estos estudios y otros también sugieren que el suministro de aire filtrado cerca de la zona de respiración (por ejemplo, operar un filtro de aire en un dormitorio con ocupantes alérgicos o asmáticos que duermen) parece ser más efectivo que el HVAC central o la filtración de aire de la sala de estar (Sublett 2011). A pesar de algunas limitaciones de eficacia para las partículas alérgicas, la evidencia indica que los purificadores de aire pueden ser algo eficaces para reducir los síntomas de alergia o asma en poblaciones susceptibles, aunque la magnitud de las posibles mejoras no es muy grande.

Resumen de los impactos en los resultados de salud cardiovascular

Un total de 11 ensayos clínicos controlados que investigaron el efecto del uso de purificadores de aire en los hogares principalmente en los resultados de salud cardiovascular y los marcadores de estos mismos resultados de salud en sujetos sin alergias o asma se resumen en la Tabla 5. Salud medida los resultados incluyen la función pulmonar, el condensado de la respiración exhalada, la presión arterial y/o la frecuencia cardíaca, mientras que los marcadores de resultados de salud incluyen biomarcadores de la función endotelial microvascular, inflamación, estrés oxidativo y/o daño pulmonar. La tabla 5 incluye cuatro estudios informados en Fisk (2013) y siete

estudios adicionales publicados desde entonces. Ocho estudios investigaron filtros de partículas portátiles de alta eficiencia (típicamente HEPA), dos estudios investigaron los filtros de partículas de aire acondicionado central o de aire acondicionado de ventana con recirculación de aire, y un estudio investigó una unidad montada en una ventana con suministro de ventilación de aire exterior. Diez estudios incluyeron resultados de salud a corto plazo, mientras que solo un estudio incluyó resultados de salud a largo plazo (de un año).

Diez de los 11 ensayos clínicos controlados encontraron una mejora significativa en al menos un resultado medido de salud cardiovascular o marcador de resultados de salud cardiovascular, incluidos todos los estudios con diseños experimentales sólidos. La magnitud de las mejoras medidas en los resultados o marcadores de salud a corto plazo fue generalmente entre el 5 y el 10 por ciento en comparación con los grupos de control o las condiciones. La evidencia de un efecto beneficioso fue generalmente más fuerte y más consistente para los estudios en lugares con concentraciones de partículas más altas. Cabe señalar que los beneficios para la salud derivados de una menor exposición a las partículas en el aire, incluso en personas sanas, se acumulan más claramente durante largos períodos de tiempo (años) en lugar de durante la corta duración (días a semanas) de estos estudios de intervención (Pope and Dockery 2006). Por lo tanto, es probable que los resultados de estos estudios a corto plazo capturen solo una fracción de los beneficios esperados. De hecho, en el único estudio a largo plazo, algunos cambios en los resultados de salud (por ejemplo, la presión arterial) fueron de una magnitud similar a los observados en estudios a corto plazo, mientras que los cambios en otros resultados de salud (por ejemplo, marcadores de inflamación y estrés oxidativo) fueron mucho mayores (por ejemplo, aproximadamente el 50 por ciento) (Chuang et al. 2017).

Resumen de los ensayos clínicos controlados de salud y sus limitaciones

De los 20 ensayos clínicos controlados residenciales revisados, 19 encontraron reducciones estadísticamente significativas en las exposiciones interiores a $PM_{2.5}$, PM_{10} en interiores y el número de partículas con el uso de purificadores de aire, mientras que los niveles de alérgenos en el aire o el polvo se redujeron en solo uno de cada tres estudios que evaluaron los alérgenos. La mayoría de las reducciones de la exposición a la PM en el aire con HEPA u otros purificadores de aire portátiles de alta eficiencia fueron del orden de aproximadamente el 50 por ciento o más. Solo tres estudios investigaron el uso de purificadores de aire instalados en ductos en sistemas centrales, y las reducciones en la exposición a PM no fueron tan consistentemente grandes.

Diecinueve de los 20 ensayos clínicos controlados residenciales también encontraron asociaciones estadísticamente significativas entre la introducción y el uso de limpiadores de aire (y típicamente la reducción de exposición en interiores) y al menos una medida de resultados de salud o un marcador de resultados de salud. Sin embargo, la mayoría de las mejoras en la salud fueron relativamente modestas en magnitud y, cuando se midieron los resultados múltiples, generalmente solo una fracción de los resultados en la salud o los biomarcadores de los resultados en la salud fueron afectados.

Aunque estos ensayos clínicos controlados sugieren efectos positivos de los purificadores de aire en los resultados de salud, se debe tener cuidado al interpretar muchos de sus resultados. Por un lado, algunos estudios sobre los beneficios para la salud de la limpieza del aire involucran múltiples intervenciones, como el uso de fundas de colchones y almohadas, la exclusión de las mascotas del dormitorio, los baños semanales

para mascotas o la limpieza con aspiradora, y por lo tanto no son necesariamente útiles para determinar los efectos de purificadores de aire solo. Además, los resultados de salud objetivos múltiples generalmente se midieron, pero generalmente solo una fracción de los resultados medidos tuvieron cambios significativos, y en ocasiones con patrones diurnos inconsistentes o períodos de demora entre las exposiciones y los resultados, mientras que los otros no cambiaron o los cambios no fueron significativos.

Sin embargo, los resultados de los estudios revisados aquí continúan sugiriendo, al igual que en Fisk (2013), que la filtración de partículas en los hogares (principalmente mediante purificadores de aire portátiles con CADR de tamaño apropiado) puede reducir las concentraciones de PM en interiores de varias fuentes y tamaños en un promedio de aproximadamente el 50 por ciento, mientras que los niveles de alérgenos en el polvo se ven menos afectados. El uso de purificadores de aire también se ha relacionado con la reducción de algunos síntomas de alergia y asma, y se ha demostrado que reducir las concentraciones de PM en el interior de los purificadores de aire tiene un impacto beneficioso en algunos marcadores de efectos cardiovasculares asociados con la exposición a PM de interior tanto de origen interior como exterior.

Además de estos estudios de intervención, hay pruebas suficientes de que reducir la exposición a partículas suspendidas en el aire exterior tiene beneficios a largo plazo y a corto plazo para la

salud cardiovascular y respiratoria, entre otros (U.S. EPA, 2009). Teniendo en cuenta lo que se sabe, es razonable y lógico suponer que, dado que gran parte de la exposición humana a partículas de origen exterior se produce en interiores y que la limpieza del aire puede reducir sustancialmente las exposiciones interiores a estas partículas, la mortalidad y la morbilidad asociadas con la exposición a partículas al aire libre podrían ser reducidas con el uso de una mejor limpieza del aire. Varios estudios han estimado que los beneficios para la salud potenciales del uso de la filtración de partículas para reducir las exposiciones en interiores a PM de origen exterior, incluidas las emisiones de incendios forestales, son grandes, y los beneficios financieros estimados superan con creces los costos estimados (Fisk y Chan 2017a, b; Montgomery et al. 2015; Zhao et al. 2015). Otro estudio de modelación reciente llegó a conclusiones similares sobre el uso de filtros de carbón activado en hogares para reducir el ozono en interiores de origen exterior (Aldred et al. 2015).

No se encontraron ensayos clínicos controlados hasta la fecha que hayan investigado los efectos de la filtración en fase gaseosa, los ESP, los ionizadores, los sistemas de PCO o los sistemas de plasma en equipos de limpieza de aire portátiles o en conductos en hogares con concentraciones de contaminantes en interiores y síntomas de salud asociados. La escasez de datos resulta en poca evidencia científica para evaluar si estos dispositivos están asociados con una reducción en los síntomas de salud.

Tabla 4. Ensayos clínicos controlados de resultados de salud principalmente respiratorios en casas con sujetos con alergias o asma

| Ensayo [clínico] | Brehler et al. (2003) | Francis et al. (2003) | Bernstein et al. (2006) | Sulser et al. (2009) |
|--|---|--|--|---|
| Asignaturas | 44 adultos con alergias y/o asma | 30 adultos alérgicos a gatos o perros alérgenos | 19 niños asmáticos sensibilizados con el moho, de 5 a 17 años de edad | 30 niños asmáticos sensibles al alérgeno de mascotas |
| Tipo de edificio | Viviendas (24 rurales, 20 urbanas) | Hogares con gatos o perros | Hogares con sistemas de aire acondicionado central forzado | Hogares con altos niveles de alérgenos de gatos o perros en polvo |
| Enfoque de exposiciones | Partículas generales, pólenes | Alérgeno de mascotas | Alérgenos en polvo, bacterias y hongos en el aire y el polvo | Alérgeno de mascotas |
| Primer filtro de ubicación, tipo y CADR | Suministro de aire exterior del dormitorio (aire fresco, sin filtro) | Dormitorio (HEPA, CADR desconocido) | Conducto HVAC central (CREON2000 UVGI con prefiltro HEPA) | Dormitorio (220 cfm) |
| Segundo filtro de ubicación, tipo y CADR | n/a | Sala de estar (HEPA, CADR desconocido) | n/a | Sala de estar (220 cfm) |
| Filtración en fase gaseosa | No | No | No | No |
| Periodo del ensayo | 2 semanas | 12 meses | 8 semanas | 12 meses |
| Reducción de las exposiciones | No reportado | <ul style="list-style-type: none"> • SS y reducciones sustanciales en Alérgenos de perros y gatos suspendidos en el aire en ambos Grupos • Reducciones en el grupo de intervención no SS en relación con las reducciones en el grupo de control | <ul style="list-style-type: none"> • Reducción pequeña pero no de SS en el moho. Recuentos de bacterias en el aire interior con UVGI. unidad versus placebo • No hay diferencia de SS en alérgenos o mohos en muestras de polvo de la casa | Ningún cambio de SS en la concentración de alérgenos de gatos y perros en el polvo |
| Cambio en alergia y síntomas de asma | <ul style="list-style-type: none"> • Sujetos con alergia estacional: • Nariz^a ↓ (30%) ↔ • Ojos^a ↓ (42%) ↔ • Pulmón ↔ • Sujetos con alergia perenne: • Nariz ↔ • Ojos ↔ • Pulmón ↔ | n/a | Primer período de tratamiento solamente: <ul style="list-style-type: none"> • síntomas de asma ↓ • Uso de medicamentos para el asma ↓ | <ul style="list-style-type: none"> • Nasal ↓ • Nocturno ↓ Puntaje de calidad de vida pediátrica |
| Cambio en resultados objetivos de salud | <ul style="list-style-type: none"> • Flujo espiratorio máximo (PEF, una medida de qué tan rápido puede exhalar una persona) en la mañana (5%) • PEF en el día ↔ | <ul style="list-style-type: none"> • Hiperreactividad bronquial y/requisitos de tratamiento del asma ↓ • Volumen espiratorio forzado (FEV, cómo Mucho aire que una persona puede exhalar durante una aliento) ↔ • Capacidad vital forzada (monto total de aire exhalado durante una prueba FEV) | Ambos periodos de tratamiento: <ul style="list-style-type: none"> • Variabilidad de la tasa de flujo espiratorio máximo (PEF) (~2% media; ~59% mediana) | <ul style="list-style-type: none"> • Volumen espiratorio forzado (FEV) • Proteína catiónica eosinófila (marcador de inflamación) ↔ • Tendencia no SS hacia una mejora hiperreactividad bronquial |
| Evaluación de la fuerza de estudio | Fuerte (cruzado, con placebo, orden aleatorizado de exposición) | Moderada (asignación aleatoria a la intervención frente al grupo control, sin placebo) | Moderada (asignación aleatoria, placebo, diseño cruzado), pero tamaño de muestra pequeño | Fuerte (grupo controlado con placebo, asignación aleatoria a grupos) |
| Autor (es) principal (s) conclusión (es) | Recomienda sistemas de filtración de aire fresco en habitaciones. | “Pequeña pero significativa mejora en el resultado combinado de asma”. | “La irradiación UV central fue efectiva en reduciendo la hipersensibilidad de la vía aérea manifestado como caudal máximo espiratorio Variabilidad y algunos síntomas clínicos”. | “Aunque los filtros de aire HEPA retuvieron alérgenos de mascotas suspendidos en el aire, no se observaron efectos en la actividad de la enfermedad...”. |

Tabla 4 (continuación). Ensayos clínicos controlados de resultados de salud principalmente respiratorios en casas con sujetos con alergias o asma

| Ensayo [clínico] | Xu et al. (2010) | Butz et al. (2011) | Lanphear et al. (2011) | Park et al. (2017) |
|--|---|--|---|---|
| Asignaturas | 30 niños con asma | 85 children with asthma ^b | 215 niños con asma | 16 niños con asma y / o rinitis alérgica |
| Tipo de edificio | Casas en el estado de Nueva York | Casas con fumadores | Casas con fumadores | Casas en California |
| Enfoque de exposiciones | Partículas generales y gases. | Humo de tabaco ambiental | Humo de tabaco ambiental | Partículas generales |
| Primer filtro de ubicación, tipo y CADR | Dormitorios (HEPA, ~150 cfm, con ~3 cambios de aire por hora de ventilación de aire exterior) | Dormitorio (HEPA, 225 cfm) | Dormitorio (HEPA, 220 cfm) | Sala de estar (HEPA con carbón activado, ~600 cfm) |
| Segundo filtro de ubicación, tipo y CADR | n/a | Sala de estar (HEPA, 225 cfm) | Sala de actividades principal (HEPA, 220 cfm). | Dormitorio (HEPA con carbón activado ~450 cfm) |
| Filtración en fase gaseosa | No | Sí (carbón activado) | Sí (zeolita de carbón activado y permanganato de potasio) | Sí (carbón activado) |
| Periodo del ensayo | 6 semanas | 6 months | 12 months | 12 weeks |
| Reducción de las exposiciones | <ul style="list-style-type: none"> • 72% (PM_{2.5-10}) • 59% (TVOC) | <ul style="list-style-type: none"> • Grupo de intervención: SS 19.9 y 8.7 µg/m³ (59% y 46%) disminuye en PM_{2.5} y PM₁₀, respectivamente versus grupo de control • Grupo controlado: 3.5 y 2.4 µg/m³ (9% y 14%) aumenta en PM_{2.5} y PM₁₀, respectivamente • No hay cambios de SS en la nicotina ni en la orina | <ul style="list-style-type: none"> • SS 25% de reducción en el conteo de partículas >0.3 µm en el grupo de intervención relativo al 5%. reducción en el grupo de control • No hay reducciones de SS en el recuento de partículas >5 µm o nicotina suspendida en el aire | 43% (PM _{2.5}) |
| Cambio en alergia y síntomas de asma | n/a | <ul style="list-style-type: none"> • Días sin síntomas ↓ (10%) • Días de actividad lenta ↔ • Tos nocturna ↔ • Sibilancias ↔ • Cofre apretado ↔ | • Síntomas de asma ↔ | <ul style="list-style-type: none"> • Resultados de las pruebas de control del asma ↑ (~ 45%) • Puntuaciones de síntomas nasales ↓ (~ 30%) |
| Cambio en resultados objetivos de salud | <ul style="list-style-type: none"> • Flujo espiratorio máximo (PEF) ↑ • Concentración de nitrato en el aliento exhalado (marcador de inflamación pulmonar) ↓ • Condensación del aliento exhalado pH (marcador de inflamación pulmonar) ↑ | n/a | <ul style="list-style-type: none"> • Visitas no programadas relacionadas con el asma a un proveedor de atención médica ↓ (25%) • Óxido nítrico exhalado (indicador de inflamación) • Uso de medicamentos ↔ | • Flujo espiratorio máximo (PEF) ↑ (~100%) |
| Evaluación de la fuerza de estudio | Débil (todos los participantes recibieron una intervención cruzada, con diferentes tiempos aleatorizados; el tamaño del efecto es difícil de interpretar) | Moderada (asignación aleatoria a la intervención frente al grupo controlado, sin placebo) | Fuerte (grupo control con placebo, asignación aleatoria a grupos) | Débil (control aleatorizado y grupos de intervención, tamaño de muestra pequeño de 8 hogares por grupo, sin placebo, sin cruce) |
| Autor (es) principal (s) conclusión (es) | “La limpieza del aire en combinación con la ventilación puede reducir efectivamente los síntomas para las personas con asma”. | Los purificadores de aire reducen las partículas y los días sin síntomas, pero no evitan la exposición al humo de segunda mano. | Los purificadores de aire prometen “como parte de una estrategia multifacética para reducir la morbilidad del asma”. | “La reducción de PM _{2.5} en interiores con purificadores de aire puede ser un medio eficaz para mejorar los resultados clínicos en pacientes con enfermedades alérgicas”. |

SS = estadísticamente significativo; Símbolos: ↑ Aumento (ES a menos que se indique lo contrario), ↓ Disminución (ES a menos que se indique lo contrario), ↔ Sin cambios

^aMejorado en el registro matutino pero no posteriormente en el registro diario.

^bExcluyendo sujetos en grupo con purificadores de aire además de consejero de salud.

^cES Mejora en días sin síntomas cuando los sujetos con purificadores de aire, con y sin un consejero de salud, fueron comparados con los controles.

^dEn realidad, el estudio no informó cambios en los síntomas del asma, sino indicadores de síntomas del asma.

^eNo fue revisado en [el estudio de] Fisk (2013).

Tabla adaptada de Fisk (2013) con permiso del editor.

Tabla 5. Ensayos clínicos controlados de resultados de salud principalmente cardiovascular en casas no dirigidos a sujetos con alergias o asma

| Estudio | Bräuner et al. (2008) | Allen et al. (2011) | Lin et al. (2011) | Weichenthal et al. (2013) |
|---|---|---|--|---|
| Sujetos | 41 adultos no fumadores entre 60-75 años de edad | 45 adultos | 60 adultos jóvenes saludables no fumadores (estudiantes) | 37 adultos y niños, 6 con asma |
| Tipo de Edificación | Residencias urbanas dentro de los 350m de un camino principal en Dinamarca | 25 residencias en una ciudad pequeña en Canadá | Residencias en Taiwan | Casas First Nation en Canada, la mayoría con humo de tabaco |
| Enfoque de las exposiciones | Partículas generales | Humo de leña | General particles | Partículas generales, humo de tabaco |
| Ubicación del primer filtro, tipo, y CADR | Dormitorio (HEPA, ~320 cfm) | Dormitorio en cada casa (HEPA, 150 cfm) | Filtro en el sistema central de HVAC (3M Filtrete) | Sala de estar principal (224 cfm) |
| Ubicación del Segundo filtro, tipo y CADR | Sala de estar (HEPA, ~320 cfm) | Sala (HEPA, 300 cfm) | n/a | n/a |
| Filtración de fase gaseosa | No | No | No | No |
| Periodo del ensayo clínico | 2 días | 1 semana | 4 semanas | 1 week |
| Grado de concentración de la exposición sin tratamiento | 12.6 µg/m ³ (PM _{2.5} media geométrica) 9.4 µg/m ³ (PM _{2.5-10} media geométrica) 10,016 cm ⁻³ (total 10-700 nm) | 11.2 µg/m ³ (PM _{2.5} media) | 22.8 ± 12.2; 24.5 ± 13.0 µg/m ³ (PM _{2.5} media) | 49.0 µg/m ³ (PM ₁₀) 42.5 µg/m ³ (PM _{2.5}) 37.5 µg/m ³ (PM ₁) |
| Reducción en exposiciones | 63% (PM _{2.5} media geométrica) 51% (PM ₁₀ media geométrica) 68% (total 10-700 nm) | 60% PM _{2.5} 74% Levoglucosano (marcador de humo de leña) | ~20% de reducción de PM ^{2.5} | 54% (PM ₁₀) 61% (PM _{2.5}) 62% (PM ₁) |
| Cambio en resultado del objetivo de salud | Función microvascular (predicador de eventos coronarios) ↓ (8%) Hemoglobina ↓ (1%) Biomarcador de inflamación ↔ Biomarcador de coagulación ↔ | Índice de hiperemia reactiva (predicador de eventos coronarios) ↓ (9%) Proteína C reactiva (PCR) (marcador de inflamación) ↓ (33%) Estrés oxidativo ↔ | Presión arterial sistólica ↓ (11%) Presión arterial diastólica ↓ (7%) Ritmo cardíaco ↓ (7%) | Presión arterial sistólica ↓ (7%) Presión arterial diastólica ↓ (6%) Flujo espiratorio forzado (PEF) ↓ (6%) Capacidad vital forzada ↔ Flujo espiratorio máximo ↓ (8%) Índice de hiperemia reactiva (predice un síndrome coronario) ↔ |
| Evaluación de la solidez del ensayo clínico | Sólido (ciego, de intervención de placebo controlado, dentro del sujeto, orden aleatorizada de exposición) | Sólido (orden aleatorizada de exposición cruzada con placebo) | Débil (periodos de intervención siempre seguidos de periodos sin intervención) | Sólido (aleatorizado, cruzado doble-ciego con placebo) |
| Conclusiones principales del autor | La filtración del aire recirculado puede ser una forma factible de reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares. | Los predictores de morbilidad cardiovascular pueden ser influenciados favorablemente al reducir [la cantidad de] partículas con purificadores de aire. | La filtración de aire puede reducir las concentraciones de PM _{2.5} en interiores y modificar el efecto de PM _{2.5} en la presión arterial y el ritmo cardíaco en una población joven y saludable. | La reducción de PM en interiores puede contribuir a mejorar la función pulmonar en las comunidades de First Nation. |

Tabla 5 (continuación). Ensayos clínicos controlados de resultados de salud principalmente cardiovascular en casas no dirigidos a sujetos con alergias o asma

| Estudio | Karotki et al. (2013) ^e | Chen et al. (2015) ^e | Kajbafzadeh et al. (2015) ^e | Padró-Martínez et al. (2015) ^e |
|---|--|--|--|---|
| Sujetos | 48 adultos mayores no fumadores | 35 estudiantes universitarios sanos | 83 adultos sanos | 20 adultos no fumadores |
| Tipo de Edificación | 27 residencias en Dinamarca | Residencias estudiantiles en Shanghái, China | Residencias en Vancouver, British Columbia, Canadá | Unidades de vivienda públicas dentro de los 200 m de una carretera interestatal en Somerville, Massachusetts |
| Enfoque de las exposiciones | Partículas generales | Partículas en interiores de origen exterior | Partículas de tráfico y humo de leña | Partículas relacionadas con tráfico partículas generales en interiores |
| Ubicación del primer filtro, tipo, y CADR | Sala (HEPA, CADR desconocido) | Centro del cuarto (Filtrete, 141, 116, y 97 cfm para polen, polvo, y humo) | Sala (HEPA, 300 cfm para humo) | Instaladas en ventanas de salas (MERV 17, 170 cfm con ventilación de aire exterior) |
| Ubicación del Segundo filtro, tipo y CADR | Cuarto dormitorio (HEPA, CADR desconocido) | n/a | Cuarto dormitorio (HEPA, 150 cfm para humo) | n/a |
| Filtración de fase gaseosa | No | No | No | No |
| Periodo del ensayo clínico | 2 semanas | 2 días | 1 semana | 3 semanas |
| Grado de concentración de la exposición sin tratamiento | 8 µg/m ³ (PM _{2.5} mediana) 7,669 cm ³ (total) | 96.2 µg/m ³ (PM _{2.5} media) | 7.1 µg/m ³ (PM _{2.5} media) | 11,660 cm ⁻³ (cuenta total, media de medianas) |
| Reducción en exposiciones | ~50% (PM _{2.5}) ~30% (10–300 nm número de partículas) | 57% (PM _{2.5}) | 40% (PM _{2.5}) | 47% (7 nm to 3 µm number concentrations, or PNC) |
| Cambio en resultado del objetivo de salud | Función microvascular ↑ ^a ↔ Función pulmonar ↔ Biomarcadores de inflamación sistémica ↔ | Marcadores de inflamación del sistema circulatorio: • proteína monoctila quimo atractiva -1 ↓ (18%) • Interleucina-1β ↓ (68%) • Mieloperoxidasa ↓ (33%) Marcadores de coagulación circulatorios: • Ligando CD40 soluble ↓ (65%) Presión arterial sistólica ↓ (3%) Presión arterial diastólica ↓ (5%) Óxido nitroso espirado fraccional ↓ (17%) Varios otros biomarcadores de inflamación, coagulación, vasoconstricción o función pulmonar. ↔ | Biomarcadores de inflamación sistémica: • Proteína C reactiva ↓ ^b • Interleucina -6 ↔ • Células en banda ↔ • Función endotelial microvascular ↔ Índice de hiperemia reactiva ↔ | Biomarcadores de inflamación y coagulación sistémica: • Interleucina -6 (IL-6) ↑ • Proteína C reactiva ↔ • Factor de necrosis tumoral receptor alfa II (TNF-RII) ↔ • Fibrinógeno ↔ Presión arterial sistólica ↔ Presión arterial diastólica ↔ |
| Evaluación de la solidez del ensayo clínico | Fuerte [sólido] ([diseño de] intervención cruzada aleatorizada, doble ciego) | Fuerte [Sólido] ([diseño] cruzado, aleatorizado, doble-ciego con placebo) | Fuerte [Sólido] ([diseño]cruzado aleatorizado, simple ciego con placebo) | Moderada ([diseño]cruzado aleatorizado, doble ciego con placebo; muestras de tamaño pequeño) |
| Conclusiones principales del autor | Se observaron “Contrastes sustanciales de exposición en el cuarto dormitorio”. | El estudio “demostró los claros beneficios cardiopulmonares de la purificación del aire en interiores entre adultos jóvenes y sanos en una ciudad china con una fuerte contaminación ambiental del aire por partículas”. | La “asociación entre la proteína C reactiva y las PM _{2.5} en interiores entre adultos sanos en áreas afectadas por el tráfico es consistente con la hipótesis de que las partículas relacionadas con el tráfico (incluso en bajas concentraciones) desempeñan un papel importante en los efectos cardiovasculares de la mezcla de PM urbanas.” | “HEPA filtration remains a promising, but not fully realized intervention.” Associations between decreased PNC and increased IL-6 could be due to confounding factors, interference with anti-inflammatory medication use, or exposure misclassification due to time-activity patterns. |

Tabla 5 (continuación). Ensayos clínicos controlados de resultados de salud principalmente cardiovascular en casas no dirigidos a sujetos con alergias o asma

| Estudio | Chuang et al. (2017) ^d | Shao et al. (2017) ^d | Cui et al. (2018) ^e |
|---|---|---|---|
| Sujetos | 200 adultos sanos de 30 a 65 años de edad | 35 adultos mayores | 70 adultos sanos no fumadores de 10 a 26 años de edad. |
| Tipo de Edificación | Residencias en Taipei | Residencias en Beijing | Residencias en un suburbio de Shanghai |
| Enfoque de las exposiciones | Partículas generales y gases | Partículas generales (la mayoría del exterior) | Partículas generales |
| Ubicación del primer filtro, tipo, y CADR | Cuarto dormitorio (3M Filtrete MPR 1000/ MERV 11 en aire acondicionado de ventana) | Sala (Philips AC4374, HEPA y carbón activado con CADR de 215 cfm) | Área habitada (en su mayoría dormitorios) (Atmósfera de Amway, HEPA y carbón activado con una tasa de flujo de aire de 100 cfm) |
| Ubicación del Segundo filtro, tipo y CADR | Cuarto dormitorio principal y cuarto de visitas (3M Filtrete MPR 1000/MERV 11 en aire acondicionado de ventana) | Cuarto dormitorio (Philips AC4016, HEPA y carbón activado con CADR de 177 cfm) | n/a |
| Filtración de fase gaseosa | No | Si | Si |
| Periodo del ensayo clínico | 1 año | 2 semanas | 1 día (la noche incluida) |
| Grado de concentración de la exposición sin tratamiento | <ul style="list-style-type: none"> • 21.4 µg/m³ (PM_{2.5} media) • 1.22 ppm (TVOC media) | 60 µg/m ³ (PM _{2.5} mean) | <ul style="list-style-type: none"> • 33.2 µg/m³ (PM_{2.5} media) • 5938 #/cm³ (count media) |
| Reducción en exposiciones | <ul style="list-style-type: none"> • ~40% (PM_{2.5} media) • ~65% (TVOC media) | 60 µg/m ³ (PM _{2.5} media) | <ul style="list-style-type: none"> • ~72% (PM_{2.5} media) • ~59% (PM count media) |
| Cambio en resultado del objetivo de salud | <ul style="list-style-type: none"> • Presión arterial sistólica ↓ (7%) • Presión arterial diastólica ↓ (6%) • Proteína reactiva C de alta sensibilidad (hs-CRP, un marcador de inflamación) ↓ (50%) • 8-hidroxi-2'-desoxiguanosina (8-OHdG, un marcador de estrés oxidativo) ↓ (53%) • Fibrinógeno (marcador de coagulación sanguínea ↔) | <ul style="list-style-type: none"> • IL-8 (inflamación sistémica) ↓ (58%)^d • Medición del aire exhalado condensado ↔ • Medición de la función pulmonar ↔ • Presión arterial ↔ • Variabilidad del ritmo cardíaco ↔ | <ul style="list-style-type: none"> • Obstrucción de las vías respiratorias ↓ (7%) • Resistencia de las vías respiratorias ↓ (7%) • Poca resistencia de las vías respiratorias ↓ (20%) • Factor Von Willebrand (vWF) ↓ (27%) • FEV1 y FVC • Presión arterial ↔ • IL-6 ↔ |
| Evaluación de la solidez del ensayo clínico | Fuerte [sólido] (intervención ciega aleatorizada, cruzada con un tamaño de muestra grande y de larga duración) ^c | Moderada (intervención ciega cruzada aleatorizada), pero de corta duración y tamaño de muestra pequeño | Fuerte [sólido] (intervención cruzada aleatorizada, ciega, con tamaño de muestra mediano/grande pero de corta duración) |
| Conclusiones principales del autor | "... la exposición a la contaminación del aire se asoció con la inflamación sistémica, el estrés oxidativo y la presión arterial elevada". Y "la filtración a largo plazo de la contaminación del aire con un filtro de aire acondicionado se asoció con la salud cardiovascular de los adultos". | "... los resultados mostraron que la filtración del aire interior produjo una clara mejora en la calidad del aire interior, pero no se observaron cambios demostrables en los resultados cardiopulmonares de interés para el estudio observados en las personas mayores que viven con exposiciones a la contaminación del aire en el mundo real". | "Una sola filtración de aire residencial durante la noche, capaz de reducir sustancialmente las concentraciones de partículas en el interior, puede mejorar la mecánica de las vías respiratorias y reducir el riesgo de trombosis". |

SS = estadísticamente significativo, m³ = metros cúbicos; Símbolos: ↑ Aumentar (SS a menos que se indique lo contrario), ↓ Disminuir (SS a menos que se indique lo contrario), ↔ Sin cambios

^aSe observaron efectos SS sobre la función microvascular (aproximadamente una mejora del 6% en promedio) entre los sujetos que no tomaron ningún fármaco vasoactivo cuando controlaron la disminución de las concentraciones de PM_{2.5} en el interior, lo que sugiere que las mejoras en la función vascular se relacionaron con la efectividad de los purificadores de aire en cada habitación.

^bUn aumento de SS solo ocurrió en las casas afectadas por el tráfico, no en las casas afectadas por el humo de leña.

^cLos autores observaron que aun cuando la intención era ocultar los filtros de intervención (Filtrete) y el controlado (gasa gruesa), los participantes no ignoraron esto completamente porque los dos filtros se veían muy diferentes.

^dMedido en el grupo combinado (enfermedad pulmonar obstructiva crónica [EPOC] y no EPOC); El grupo con EPOC también experimentó una reducción del 70% en IL-8.

^eNo revisado en Fisk (2013).

Tabla adaptada de Fisk (2013) con permiso del editor.

Descripciones detalladas de los ensayos clínicos controlados en la salud

Cada uno de los ensayos clínicos controlados resumidos en la Tabla 4 que investigaron los efectos del uso de purificadores de aire en las casas, los resultados objetivos de la salud respiratoria y los cambios en los síntomas de alergia o asma en sujetos con alergias o asma se describen con más detalle abajo.

1. Brehler et al. (2003) realizaron un estudio cruzado aleatorizado, controlado, doble ciego, de dos períodos para investigar la eficacia de los sistemas de filtración de aire fresco instalados en los dormitorios de 44 voluntarios adultos en Alemania que padecen fiebre del heno. Los sistemas de filtración se utilizaron durante un total de 4 semanas en cada hogar: 2 semanas con un filtro activo y 2 semanas con un placebo. Los sistemas combinados de ventilación y filtración utilizaron un ventilador conducido hacia el exterior para llevar aire del exterior para proporcionar ventilación, y el aire del exterior se filtró utilizando una clase de filtro F7 europeo (aproximadamente equivalente a MERV 13). El flujo de ventilación del aire exterior se puede controlar entre aproximadamente 500 y 2,000 cfm. No se realizaron mediciones de exposición en interiores. Hubo una disminución significativa en los síntomas de la fiebre del heno durante la noche y un aumento en las tasas de flujo espiratorio máximo de la mañana, aunque no se observaron efectos en voluntarios que también tenían alergias perennes.
2. Francis et al. (2003) realizaron un estudio aleatorizado de grupos paralelos en el Reino Unido para investigar los efectos clínicos de colocar purificadores de aire portátiles en la sala de estar y en el dormitorio de 30 adultos asmáticos sensibilizados y compartiendo un hogar con

gatos o perros durante 12 meses. El grupo de estudio incluyó filtros de aire y el uso de aspiradoras con filtro HEPA, mientras que el grupo de control incluyó el uso de aspiradoras con filtro HEPA solo. Los filtros de aire tenían filtros HEPA con un CADR desconocido (Honeywell Modelo DA-5018). Los efectos clínicos medidos incluyeron medidas de la capacidad de respuesta de las vías respiratorias, los requisitos de tratamiento, la función pulmonar y el flujo máximo, cuyos resultados se combinaron en un único resultado combinado de asma. Las mediciones de alérgenos en superficies y suspendidos en el aire se tomaron antes y después de las intervenciones. Se observó una mejoría estadísticamente significativa en los resultados combinados del asma en 10 de los 15 sujetos en el grupo activo en comparación con solo tres de los 15 sujetos en el grupo control después de 12 meses de intervención. No hubo diferencias significativas entre los grupos activo y de control para los cambios en las medidas de la función pulmonar, el alérgeno de las mascotas en depósito o el alérgeno de las mascotas suspendidos en el aire.

3. Bernstein et al. (2006) realizaron un ensayo cruzado, doble ciego, controlado con placebo para investigar los efectos de las unidades de irradiación UV con un prefiltro HEPA (unidades CREON2000) instaladas en sistemas de aire acondicionado central de aire acondicionado en las casas de 19 niños asmáticos sensibilizados con el moho, de 5 a 17 años. El estudio duró 28 semanas e incluyó 8 semanas con la unidad UVGI en funcionamiento y 8 semanas con placebo. El orden en que se usaron los sistemas se asignó al azar entre el grupo de estudio. Las mediciones de los resultados clínicos incluyeron la variabilidad y las tasas de flujo espiratorio

máximo matutino y vespertino, cambios en el volumen espiratorio forzado en 1 segundo, cambios en las puntuaciones de síntomas de asma y rino-conjuntivitis totales y puntuaciones de calidad de vida, y cambios en el uso de medicamentos. El moho suspendido en el aire y los recuentos de bacterias también se midieron. Los controles tenían una luz azul simulada instalada en el sistema HVAC. Hubo una pequeña, pero no significativa reducción en el recuento de moho y bacterias en el aire interior con la unidad UVGI en funcionamiento, mientras que no hubo una diferencia significativa en los alérgenos o mohos en las muestras de polvo doméstico. Los autores concluyeron en una mejoría estadísticamente significativa en la variabilidad de la tasa de flujo espiratorio máximo con la unidad UVGI en comparación con el placebo para ambos períodos de tratamiento (la mejoría media fue del 2 por ciento, mientras que la mejoría media fue de aproximadamente el 59 por ciento). Además, solo durante el primer período de tratamiento, hubo una mejoría estadísticamente significativa en las puntuaciones de los síntomas del asma, el número de días con síntomas de asma, el uso total de medicación para el asma y la variabilidad máxima de la tasa de flujo espiratorio en sujetos que recibieron las unidades UVGI en comparación con las unidades de placebo. No se observaron diferencias significativas entre las unidades de UVGI y las unidades de placebo de otras mediciones de resultados clínicos o ambientales. Los autores concluyeron que “la irradiación UV central fue eficaz para reducir la hipersensibilidad de las vías respiratorias manifestada como una variabilidad del flujo espiratorio máximo y algunos síntomas clínicos”.

4. Sulser et al. (2009) realizó un ensayo controlado aleatorizado de 30 niños asmáticos con sensibilización a alergias de perros y gatos para probar el efecto de los purificadores de aire HEPA (IQ Air Allergen 100 con un CADR de aproximadamente 220 cfm) colocado en la sala de estar y el dormitorio en función pulmonar, síntomas de alergia y niveles de alérgenos en el polvo doméstico (Sulser et al. 2009). Después de 6 a 12 meses, no hubo un cambio significativo en la función pulmonar (medida por el flujo espiratorio máximo) o en el uso de medicamentos; sin embargo, hubo una leve mejoría en la sensibilidad bronquial. No hubo cambios en las concentraciones de alérgenos en las muestras de polvo. En general, el estudio concluyó que la eficacia de estos purificadores de aire como terapia para el asma es dudosa.
5. Xu et al. (2010) realizó un estudio de campo en el que se instaló un suministro combinado de ventilación de aire exterior y una unidad de filtración HEPA en los dormitorios de niños con asma diagnosticados por un médico durante un período de 6 semanas a la vez. La unidad proporcionó aproximadamente tres cambios de aire por hora de aire de ventilación y aproximadamente nueve cambios de aire por hora de flujo de recirculación a través del filtro (es decir, un CADR de aproximadamente 150 cfm). El condensado del aire exhalado se recolectó cada seis días y se analizó en busca de nitrato y pH, y también se midió el flujo espiratorio máximo. Las mediciones del aire interior incluyeron PM_{10} , monóxido de carbono, dióxido de carbono y TVOC en cada habitación. Las concentraciones interiores de PM_{10} y TVOC disminuyeron con el funcionamiento del dispositivo en un promedio de 72

y 59 por ciento, respectivamente. Las concentraciones de nitrato de condensado exhaladas en el aire disminuyeron significativamente y los flujos espiratorios máximos aumentaron significativamente con el funcionamiento de la unidad.

6. Butz et al. (2011) probaron el uso de un filtro de aire portátil y una intervención del consejero de salud para reducir la exposición al humo de segunda mano en niños con asma que viven con un fumador. Los purificadores de aire utilizados fueron el purificador de aire Holmes Harmony HAP650 con un filtro de carbón activado y un filtro HEPA plisado y un CADR de 225 cfm. Los purificadores de aire portátiles se instalaron en el dormitorio del niño y en la sala de estar de su casa. Midieron las concentraciones internas de PM, nicotina y cotinina en orina y rastrearon la cantidad de días con síntomas de asma en los niños. Los grupos de estudio asignados al azar incluyeron a los que recibieron solo purificadores de aire, purificadores de aire más un consejero de salud, o la instalación atrasada del purificador de aire (es decir, el controlado). Cada grupo contenía aproximadamente 40 niños y el estudio duró 6 meses. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} fueron significativamente más bajas en ambos grupos de filtros de aire en comparación con el grupo control, pero no se encontraron diferencias en las concentraciones de nicotina en el aire interior o cotinina en la orina. La introducción de un consejero de salud no proporcionó una reducción adicional en las concentraciones de PM. Los días sin síntomas aumentaron significativamente en ambos grupos de filtros de aire en comparación con el grupo de control, en un promedio de aproximadamente el 10 por ciento. El estudio concluyó que aunque el uso de filtros de aire reducía las concentraciones de PM en interiores y aumentaba los días sin síntomas, no era adecuado para prevenir la exposición al humo de segunda mano.
7. Lanphear et al. (2011) realizó un ensayo aleatorizado doble ciego para evaluar los efectos de los purificadores de aire HEPA en las visitas no programadas de asma y los síntomas en niños con asma expuestos al humo de segunda mano. Los purificadores de aire HEPA (Austin Healthmate, con lo que parece ser un CADR de 220 cfm) también contenían inserciones de filtro de permanganato de zeolita de carbono-potasio para adsorber los gases. Se instalaron dos purificadores de aire; uno en el dormitorio del niño y otra en el sala de estar principal. Un total de 225 niños se inscribieron en el estudio; 110 fueron asignados al grupo de intervención con un filtro de aire HEPA activo, y 115 al grupo de control con un filtro de aire simulado. Los niños en el grupo de intervención tuvieron aproximadamente un 18 por ciento menos de visitas de asma no programadas que el grupo controlado, lo que corresponde con una reducción del 25 por ciento en las concentraciones de partículas ($> 0.3 \mu m$) en el grupo de intervención en comparación con una reducción del 5 por ciento en el grupo controlado. No hubo diferencias estadísticamente significativas en los síntomas de asma informados por los padres, los niveles de óxido nítrico exhalado, los niveles de nicotina en el aire o los niveles de cotinina entre los grupos.
8. Park et al. (2017) evaluaron la eficacia de los purificadores de aire portátiles para reducir las concentraciones interiores de $PM_{2.5}$ y los resultados de salud en niños con asma y/o rinitis alérgica en 16 hogares en California. Se instalaron purificadores de aire en la sala de estar

y los dormitorios de los sujetos durante un período de estudio de 12 semanas. Los purificadores de aire utilizaron un sistema de filtro de tres pasos: filtro de polvo, filtro de carbón activado y filtro HEPA (modelos Samsung AX7000 y AX9000, con CADR de aproximadamente 450 cfm y aproximadamente 600 cfm). Ocho hogares recibieron purificadores de aire y ocho hogares no. La concentración promedio de $PM_{2.5}$ en interiores fue un 43 por ciento más baja en el grupo de filtros de aire (de 7.4 a 4.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A las 12 semanas, el grupo de purificadores de aire mostró mejoras en los puntajes de las pruebas de control del asma infantil y las tasas de flujo pico promedio en la noche, mientras que el grupo de control mostró un deterioro en las mismas medidas. Las puntuaciones de los síntomas nasales totales y durante el día también fueron significativamente más bajas en el grupo de purificadores de aire.

Cada uno de los ensayos clínicos controlados resumidos en la Tabla 5 que investigaron los efectos del uso de purificadores de aire en las casas, principalmente en los resultados de salud cardiovascular y/o marcadores de los resultados de salud cardiovascular, incluida la función pulmonar, el condensado de aliento exhalado, la presión arterial, la frecuencia cardíaca y/o varios biomarcadores de la función endotelial microvascular, inflamación, estrés oxidativo y/o daño pulmonar se describen con más detalle a continuación.

1. Bräuner et al. (2008) investigaron los efectos de la exposición controlada a partículas del aire interior sobre la función microvascular y los biomarcadores de la inflamación y el estrés oxidativo en una población anciana sana que vive en apartamentos en Dinamarca. Un total de 21 parejas no fumadoras participaron

en un estudio aleatorizado, doble ciego, cruzado con dos exposiciones consecutivas de 48 horas a aire filtrado o no filtrado de partículas. Los filtros de aire con filtro HEPA con un caudal de 540 m^3/h (aproximadamente 320 cfm) se colocaron en la sala de estar y el dormitorio de cada apartamento. La filtración del aire interior mejoró significativamente la función microvascular en aproximadamente un 8 por ciento, y la concentración en masa de $PM_{2.5}$ fue más importante que la concentración total de partículas de 10 a 700 nm.

2. Allen et al. (2011) implementaron filtros de aire HEPA portátiles y filtración placebo en un ensayo clínico aleatorizado de intervención cruzada en 45 adultos sanos en una comunidad afectada por humo de madera durante períodos consecutivos de 7 días de aire filtrado y no filtrado. Los purificadores de aire se instalaron en la sala de actividades principal de la casa (con un CADR de 300 cfm para el humo del tabaco), así como en las habitaciones de los participantes (con un CADR de 150 cfm para el humo del tabaco). Midieron las concentraciones de $PM_{2.5}$ en interiores utilizando un muestreo gravimétrico integrado y evaluaron la función endotelial y las medidas del estrés oxidativo y la inflamación sistémica como marcadores de la salud cardiovascular. Los filtros HEPA redujeron las concentraciones de $PM_{2.5}$ en interiores en 24 de 25 hogares, con una reducción media del 60 por ciento. Las concentraciones resultantes de fuentes infiltradas tanto en interiores como en exteriores se redujeron significativamente. La filtración de aire se asoció con una función endotelial mejorada y concentraciones reducidas de biomarcadores inflamatorios pero no con marcadores de estrés oxidativo. Específicamente, la filtración HEPA se asoció con un aumento del 9.4 por

ciento en el índice de hiperemia reactiva, un indicador de la función endotelial microvascular y una disminución del 32.6 por ciento en la proteína C reactiva, un indicador de inflamación.

3. Lin et al. (2011) evaluaron si el uso de filtros mejorados de aire acondicionado central (3M Filtrete) reduciría el $PM_{2.5}$ en interiores y afectaría la presión arterial y la frecuencia cardíaca en una población joven y saludable de 60 estudiantes en Taiwán. La presión arterial y la frecuencia cardíaca se controlaron de forma continua durante 48 horas a intervalos de aproximadamente 2 semanas en el transcurso de cuatro visitas domiciliarias dentro de un período de 1.5 meses cada una. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ se midieron a intervalos de 1 minuto durante cada período de estudio. También se midieron los TVOC. Las concentraciones interiores de $PM_{2.5}$ y la presión arterial y la frecuencia cardíaca de los participantes fueron más altas durante las dos primeras visitas sin un filtro que las dos últimas visitas con el filtro.
4. Weichenthal et al. (2013) realizó un estudio cruzado en una reserva de Primeras Naciones en Manitoba, Canadá, de filtros de aire electrostáticos portátiles instalados en el área de vivienda principal de 20 hogares con 37 residentes. Las medidas de la función pulmonar, la presión arterial y la función endotelial se recolectaron al principio y al final de cada período de medición de una semana. Los purificadores de aire fueron purificadores de aire ultra limpios Filtrete FAP03-RS de 3M con un CADR de 224 cfm para humo. Se instaló un placebo durante las semanas de control. Las mediciones de contaminantes en interiores incluyeron PM_1 integrado, $PM_{2.5}$ y PM_{10} ; hidrocarburos aromáticos policíclicos; varios COV; y dióxido de nitrógeno. Las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ en el interior fueron de casi un 50 por ciento más bajas con los filtros instalados, aunque las concentraciones todavía eran mucho más altas que en el exterior debido a la alta prevalencia de fumar en interiores. El uso de purificadores de aire portátiles se asoció con aumentos estadísticamente significativos en el flujo pulmonar, disminuciones en la presión arterial sistólica y disminuciones en la presión arterial diastólica. También se observaron asociaciones inversas consistentes entre $PM_{2.5}$ interior y la función pulmonar. El estudio concluyó que los purificadores de aire portátiles disponibles en el mercado pueden ofrecer reducciones sustanciales en las concentraciones de PM en interiores y que dichas reducciones pueden estar asociadas con una mejor función pulmonar, pero que los esfuerzos dirigidos a mejorar la calidad del aire en interiores deben comenzar con la reducción de las fuentes en interiores, como fumar en estas comunidades.
5. Karotki et al. (2013) realizaron un ensayo clínico controlado aleatorizado, doble ciego, cruzado con períodos consecutivos de 2 semanas con o sin un filtro de aire HEPA portátil (con un caudal desconocido y CADR) instalados en la sala de estar y el dormitorio de 48 adultos mayores no fumadores en 27 hogares para investigar sus efectos en la salud respiratoria y cardiovascular mediante medidas de inflamación y disfunción vascular. Las medidas de resultado de salud incluyeron presión arterial; función microvascular y pulmonar; y marcadores hematológicos, de inflamación, de superficie de monocitos y de células pulmonares medidos a partir de muestras

de sangre recolectadas. Los purificadores de aire redujeron las concentraciones de masa de $PM_{2.5}$ en el interior y las concentraciones de número de partículas en aproximadamente un 50 y 30 por ciento en promedio, respectivamente, aunque la eficacia varió según el hogar. No hubo diferencias estadísticamente significativas en la función microvascular y pulmonar o en los biomarcadores de la inflamación sistémica con y sin el filtro HEPA instalado. Sin embargo, hubo un pequeño impacto cuando se consideró la filtración en conjunto con concentraciones de $PM_{2.5}$ en interiores, lo que resultó en una mejor función microvascular en casas con concentraciones más bajas de $PM_{2.5}$ en interiores.

6. Chen et al. (2015) realizó un ensayo aleatorizado, doble ciego, cruzado de intervenciones de purificadores de aire portátiles a corto plazo en los dormitorios de 35 estudiantes universitarios saludables en Shanghai, China. Los estudiantes fueron asignados al azar en dos grupos y alternaron el uso de purificadores de aire verdaderos o falsos durante 48 horas con un intervalo de 2 semanas entre ellos. Los filtros de aire tenían un CADR de 141 para el polen, 116 para el polvo y 97 para el humo y tres velocidades de ventilador. Catorce biomarcadores de inflamación, coagulación y vasoconstricción; función pulmonar; presión sanguínea; y el nítrico exhalado fraccional se midió como marcadores de impactos cardiopulmonares. En promedio, la purificación del aire resultó en una reducción del 57 por ciento en las concentraciones de $PM_{2.5}$ cuando los filtros estaban funcionando. La purificación del aire se asoció significativamente con disminuciones
7. Kajbafzadeh et al. (2015) realizaron un ensayo clínico controlado cruzado aleatorizado y simple ciego para evaluar los efectos de los filtros de aire HEPA portátiles sobre las concentraciones de $PM_{2.5}$ en interiores, la función endotelial y la inflamación sistémica entre 83 adultos sanos en Vancouver, Columbia Británica, Canadá, que viven en áreas con impactos de humo de leña o de tráfico [vehicular]. La filtración HEPA, que incluyó un [filtro] ubicado en la sala de estar (Honeywell Modelo 50300 con un CADR de 300 cfm para humo) y uno ubicado en el dormitorio (Honeywell 18150 con un CADR de 150 cfm para humo), fue asociada con una disminución del 40 por ciento en las concentraciones interiores de $PM_{2.5}$, pero no hubo relación entre la exposición a $PM_{2.5}$ y la función endotelial. Hubo una asociación entre las concentraciones interiores de $PM_{2.5}$ y una medida de inflamación sistémica en casa de áreas afectadas por el tráfico de vehículos pero no por humo de leña.
8. Padró-Martínez et al. (2015) realizó un ensayo aleatorizado, doble ciego cruzado de los efectos de las unidades de filtro de aire HEPA en las salas de estar de 19 unidades de vivienda pública ubicadas a 200 m de una carretera en concentraciones de número de partículas, presión arterial y biomarcadores sanguíneos de salud cardiovascular. Los purificadores de aire eran unidades

HEPAiRx con un filtro MERV 17 y una tasa de flujo de aire de aproximadamente 170 cfm. Las concentraciones del número de partículas se redujeron entre un 21 y un 68 por ciento en los apartamentos, pero no hubo diferencias significativas en la presión arterial o tres de los cuatro biomarcadores, mientras que un biomarcador en realidad aumentó con las unidades de filtración. El estudio observó la importancia de utilizar muestras de mayor tamaño y una mejor comprensión de los patrones de tiempo y actividad que también contribuyen a las exposiciones.

9. Chuang et al. (2017) realizó un ensayo aleatorizado y ciego de los efectos de los filtros de aire acondicionado instalados en ventanas de alta eficiencia (3M Filtrete con 1000 MPR/MERV 11) instalados en 200 hogares en Taipei. Cien participantes adultos fueron asignados al azar o a un grupo controlado o a un grupo con filtración de aire y se realizaron seis visitas domiciliarias por año. El grupo controlado y el grupo de intervención se cambiaron después de 1 año. Las mediciones de contaminantes en interiores incluyeron un monitoreo las concentraciones de $PM_{2.5}$ y TVOC durante las 24 horas. La presión arterial fue monitoreada para cada participante durante cada visita. La mañana siguiente al monitoreo de la contaminación del aire, se recogieron muestras de sangre y se analizaron para detectar marcadores biológicos de salud cardiovascular, incluida la proteína C reactiva de alta sensibilidad (hs-CRP), 8-hidroxi-2'-desoxiguanosina (8-OHdG, un marcador de estrés oxidativo), y fibrinógeno. Las concentraciones interiores de $PM_{2.5}$ y TVOC fueron más bajas en los grupos de intervención de filtración en aproximadamente 40 y 65 por ciento, en promedio. Las concentraciones más bajas de $PM_{2.5}$ y TVOC también se correlacionaron con una presión arterial más baja y niveles más bajos de hs-CRP y 8-OHdG (sin cambios estadísticamente significativos en los niveles de fibrinógeno).
10. Shao et al. (2017) realizaron un ensayo aleatorizado cruzado de los efectos de las unidades portátiles de filtración de aire en $PM_{2.5}$ en interiores y biomarcadores de inflamación respiratoria y sistémica, estrés oxidativo, función pulmonar y presión arterial y función del sistema nervioso autónomo en 35 participantes ancianos no fumadores con y sin enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) en Beijing. Se instalaron filtros de aire portátiles con HEPA y filtros de carbón activado (Philips AC4374 con un CADR de 215 cfm en la sala de estar y Philips AC4016 con un CADR de 177 cfm en los dormitorios) durante un período de 2 semanas además de 2 semanas de período de instalación simulada. Las mediciones se realizaron en 20 hogares. El monitoreo de contaminantes incluyó concentraciones internas de $PM_{2.5}$ en interiores y carbón negro durante 10 días, junto con un análisis elemental de las concentraciones de $PM_{2.5}$. Los resultados clínicos incluyeron medidas de inflamación respiratoria y estrés oxidativo (p. ej., Condensado de aire exhalado), inflamación sistémica (p. ej., Fibrinógeno, proteína C reactiva, interleuquina-6, interleuquina-8), función pulmonar (p. ej., Volumen espiratorio forzado) y La presión arterial y la variabilidad del ritmo cardíaco. Las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ en el interior de 10 días fueron aproximadamente 60 por ciento más bajas en el grupo de intervención. El único cambio significativo en los puntos finales de salud fue que la interleucina-8, una medida de la inflamación sistémica,

se redujo en el grupo de filtración (tanto el grupo total como el grupo EPOC). No hubo mejoras significativas en la función pulmonar, la presión arterial o la variabilidad de la frecuencia cardíaca en las siguientes intervenciones de limpieza de aire a corto plazo.

11. Cui et al. (2018) realizó un estudio doble ciego, aleatorizado y cruzado de los efectos de la filtración de aire portátil en marcadores de resultados de salud cardiopulmonar en 70 adultos sanos no fumadores, de 19 a 26 años, durante los períodos de la noche (~13 horas) en casas de un suburbio de Shanghái, china. Cada participante recibió una filtración de aire interior verdadera y falsa, con sesiones verdaderas y falsas separadas por un intervalo de lavado de 2 semanas. Los participantes recibieron un purificador de aire disponible comercialmente con un HEPA y filtros de carbón activado y una tasa de flujo de aire de aproximadamente 100 cfm. Los participantes fueron una combinación de adultos sanos y estudiantes de enfermería que viven en residencias estudiantiles. Cada sesión comenzó a las 6 p.m. un sábado, y los participantes se quedaron y durmieron en sus dormitorios con las puertas y ventanas cerradas hasta la mañana siguiente. El ordenamiento de la filtración verdadera y falsa se asignó al azar. Las mediciones de exposición al contaminante incluyeron $PM_{2.5}$, partículas de 10 nm hasta $1 \mu m$, ozono y NO_2 . Los marcadores medidos de los resultados de salud incluyeron: función pulmonar por espirometría y oscilometría de impulso; inflamación respiratoria por óxido nítrico exhalado fraccional; Función cardiovascular mediante análisis de onda de pulso y presión arterial sistólica y diastólica; inflamación sistémica

y coagulación mediante muestreo y análisis de sangre para interleucina-6, selectina P soluble (sCD62P) y factor de von Willebrand (vWF); y estrés oxidativo sistémico por muestreo y análisis de orina para el malondialdehído libre de orina (MDA). Las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el exterior oscilaron entre 18.6 y $106.9 \mu g/m^3$ durante el estudio. En comparación con la filtración simulada, la filtración real disminuyó las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el interior y el número total de partículas en un 72.4 por ciento y un 59.2 por ciento en promedio, respectivamente. La verdadera filtración mejoró significativamente la función pulmonar medida inmediatamente después del final de la filtración, medida por la disminución de la impedancia y la resistencia de la vía aérea como indicadores de la mecánica de la vía aérea. No se observaron mejoras significativas para los indicadores de espirometría. La verdadera filtración también redujo significativamente el vWF en un 26.9 por ciento en promedio 24 horas después del final del período de filtración, lo que indica un riesgo reducido de trombosis. Finalmente, en los análisis estratificados por participantes masculinos y femeninos, el vWF y la interleucina-6 se redujeron significativamente en los varones, mientras que la presión del pulso disminuyó significativamente en las mujeres. Los autores concluyeron que un solo período de filtración de aire residencial durante la noche fue capaz de reducir sustancialmente las concentraciones de partículas en el interior y condujo a mejorar la mecánica de las vías respiratorias y reducir el riesgo de trombosis.

MAS INVESTIGACIÓN ES NECESARIA

Se necesita más investigación sobre la eficacia de la tecnología de purificadores de aire portátiles e instalados en ductos:

- Llevar a cabo ensayos clínicos controlados de salud a largo plazo de purificadores de aire portátiles e instalados en ductos.
- Recopilar mediciones de campo de la efectividad de la eliminación de contaminantes y realizar ensayos clínicos controlados de salud para tecnologías de limpieza de aire que aún no se han realizado exhaustivamente, como PCO, plasma, UVGI, tecnologías absorbentes y otras tecnologías que actualmente se están comercializando a los consumidores.
- Investigar qué aspectos del diseño y la operación del producto afectan cómo y por qué los consumidores operan limpiadores de aire portátiles e internos a lo largo de todo el ciclo de vida de un limpiador de aire (por ejemplo, tiempos de ejecución, ruido, mantenimiento, cambios de filtro) y cómo afecta la efectividad.
- Desarrollar y validar normas de ensayo de purificadores de aire específicamente para $PM_{2.5}$ en interiores, partículas ultrafinas y COV especiados.
- Desarrollar y validar sensores de contaminantes precisos para incorporar en sistemas de limpieza de aire holísticos efectivos y económicos para el consumidor (por ej., capacidad para medir con precisión concentraciones de partículas ultrafinas, $PM_{2.5}$ y COV especiados durante largos períodos de tiempo).
- Evaluar la efectividad de la eliminación de contaminantes (por ejemplo, para partículas finas y ultrafinas) de sistemas de HVAC residenciales sin conductos, como los sistemas minisplit.
- Recopilar mediciones de campo de la efectividad de la eliminación de contaminantes y realizar ensayos clínicos controlados de salud en tecnologías de limpieza de aire emergentes, como recubrimientos de materiales pasivos y muros verdes.

OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

Association of Home Appliance Manufacturers
[Asociación de fabricantes de electrodomésticos]
(AHAM): www.aham.org

ASHRAE Position Document on Filtration and Air
Cleaning [Informe de Situación de ASHRAE sobre
Filtración y Limpieza del aire]: [www.ashrae.org/
about/positiondocuments](http://www.ashrae.org/about/positiondocuments)

Información CADR: [ahamverifide.org/ahams-air-
filtration-standards/](http://ahamverifide.org/ahams-air-filtration-standards/)

Dispositivos Certificados de limpieza de Aire del
California Air Resources Board: [www.arb.ca.gov/
research/indoor/aircleaners/certified.htm](http://www.arb.ca.gov/research/indoor/aircleaners/certified.htm)

Informes del consumidor: www.consumerreports.org

El sitio web de la EPA sobre la calidad del aire
interior: www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq
(En español: www.espanol.epa.gov/cai)

El sitio web de la EPA sobre el radón: [www.epa.
gov/radon](http://www.epa.gov/radon)
(En español: [www.espanol.epa.gov/cai/acerca-del-
radon](http://www.espanol.epa.gov/cai/acerca-del-radon))

El sitio web de la EPA “Ozone Generators that are
Sold as Air Cleaners” [“Generadores de ozono que
se venden como purificadores de aire”]: [www.epa.
gov/indoor-air-quality-iaq/ozone-generators-are-sold-
air-cleaners](http://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/ozone-generators-are-sold-air-cleaners)

El documento de la EPA *Should You Have the Air
Ducts in Your Home Cleaned?* [“Debería hacer
que limpiaran los conductos de aire en su casa?”]:
[www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/should-you-
have-air-ducts-your-home-cleaned](http://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/should-you-have-air-ducts-your-home-cleaned)

El documento de la EPA *Wildfire Smoke: A Guide
for Public Health Officials* [“Humo de Incendios
Forestales: una guía para funcionarios de salud
pública”]: [www3.epa.gov/airnow/wildfire-smoke/
wildfire-smoke-guide-revised-2019.pdf](http://www3.epa.gov/airnow/wildfire-smoke/wildfire-smoke-guide-revised-2019.pdf)

National Air Filtration Association [Asociación
Nacional de Filtración de Aire]: www.nafahq.org

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

| | |
|-------------------|--|
| 8-OHdG | 8-hidroxi-2'-desoxiguanosina |
| AHAM | Association of Home Appliance Manufacturers [Asociación de fabricantes de electrodomésticos] |
| ANSI | American National Standards Institute |
| ASD | despresurización activa del suelo [active soil depressurization] |
| CADR | Tasa de entrega de aire limpio |
| CDC | Centro para el Control y Prevención de Enfermedades [Centers for Disease Control] |
| cfm | pies cúbicos por minuto |
| EPOC | enfermedad pulmonar obstructiva crónica |
| EPA | Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos |
| ESP | Precipitador electrostático |
| FPR | Clasificación de rendimiento del filtro [Filter Performance Rating] |
| hs-CRP | Proteína C reactiva de alta sensibilidad |
| HVAC | Calefacción, ventilación y aire acondicionado [Climatización]. |
| IEC | Comisión Electrotécnica Internacional |
| ISO | Organización Internacional de Normalización |
| kWh | kilovatios-hora |
| µm | micrómetro |
| m ³ | metro cúbico |
| MERV | Valor Mínimo Reportado de Eficiencia |
| MPR | Clasificación de Desempeño de Micropartículas |
| NAFA | National Air Filtration Association [Asociación Nacional de Filtración de Aire] |
| nm | nanómetro |
| PCO | Oxidación fotocatalítica |
| PM | Material particulado |
| PM _{2.5} | Material particulado fino menor de 2.5 µm de diámetro |
| PM ₁₀ | Material particulado grueso más pequeño que 10 µm de diámetro |
| ppb | partes por billón |
| RRNC | nueva construcción resistente al radón |
| TVOC | Compuestos orgánicos volátiles totales |
| UV | ultravioleta |
| UVGI | Irradiación germicida ultravioleta |
| COV | compuesto orgánico volátil |
| vWF | von Willebrand Factor |
| W | Vatios |

GLOSARIO

| | |
|---|---|
| Adsorción (Adsorption) | El proceso físico que ocurre cuando se adhieren líquidos, gases o materiales en suspensión a las superficies o en los poros de un material. |
| Agudo (Acute) | Que tiene un inicio rápido y sigue un curso corto pero potencialmente grave. |
| Alérgeno (Allergen) | Una sustancia química o biológica (por ej., polen, caspa de animales, proteínas de ácaros del polvo doméstico) que puede causar una reacción alérgica caracterizada por hipersensibilidad (una respuesta inmune exagerada). |
| Alergia (Allergy) | Una reacción inmune exagerada o patológica a respirar, comer o tocar sustancias que no tienen un efecto comparable en el individuo promedio. |
| Asma (Asthma) | Un trastorno inflamatorio generalmente crónico de las vías respiratorias caracterizado por episodios intermitentes de sibilancias, tos y dificultad para respirar, a veces asociado con una alergia a sustancias inhaladas. |
| Bacterias y mohos (Bacteria and molds) | Microorganismos que se encuentran en un estado de crecimiento y reproducción (a diferencia de las esporas solas). |
| Caída de presión (Pressure drop) | La diferencia en la presión entre dos puntos de un fluido (como en el aire) en un sistema. La caída de presión sucede cuando fuerza en fricción actúan en un fluido cuando pasa por un sistema. |
| Capacidad de purificación del aire [CADR] (Clean air delivery rate) | Medida del desempeño del purificador de aire, definida como la cantidad de aire libre de contaminantes emitido por el dispositivo, expresado en pies cúbicos por minuto (cfm). Los CADR son siempre la medida del desempeño de una unidad como un sistema completo. |
| Caspa (Dander) | Diminutas escamas de piel. La caspa también puede contener pelo o plumas. |
| Clasificación de Desempeño de Micropartículas (MPR) (Microparticle Performance Rating) | Una clasificación de propiedad privada para medir la eficiencia de filtros. |
| Clasificación de rendimiento del filtro (FPR) (Filter Performance Rating) | Una clasificación de propiedad privada para medir la eficiencia de filtros. |
| Compuestos orgánicos volátiles (COV) (Volatile organic compounds (VOCs)) | Químicos que contienen carbono y que están en estado de vapor a presión y temperatura ambiental. |
| Crónico (Chronic) | Marcado por una larga duración, por recurrencias frecuentes durante largos periodos de tiempo y, a menudo, lentamente progresando en su seriedad. |
| Descarga de corona (Corona discharge) | Una descarga eléctrica provocada por la ionización de un fluido que rodea un conductor, que se produce cuando el gradiente de potencial supera un determinado valor. |
| Desinfección (Disinfection) | El proceso de cualquier reducción o prevención del crecimiento en una población microbiana sin porcentaje de eficiencia especificado. |
| Efecto de placebo (Placebo effect) | Un resultado de salud generalmente positivo, atribuible más a los efectos psicológicos que al tratamiento farmacéutico. |

| | |
|---|---|
| Eficacia (de un purificador de aire) [Effectiveness (of an air cleaner)] | Una medida de la capacidad de un dispositivo de purificación de aire para eliminar contaminantes del espacio al que sirve. |
| Eficiencia (de un purificador de aire) [Efficiency (of an air cleaner)] | Una medida de la capacidad de un dispositivo de purificación de aire para reducir la concentración de contaminantes en el aire que pasa una vez por el dispositivo. También se conoce como eficiencia de “un solo paso”. |
| Enfermedad respiratoria alérgica (Allergic respiratory disease) | Una colección de afecciones de salud, incluyendo alergias y asma, que se caracterizan por síntomas nasales o bronquiales que pueden desencadenarse por exposiciones ambientales. |
| Ensayo de doble ciego (Double-blind study) | Un tipo de diseño de estudio de ensayo clínico en el que los participantes del estudio y los investigadores desconocen la identidad de los individuos en los grupos de intervención y control hasta que se haya completado la recopilación de datos. |
| Espora bacteriana (Bacterial spore) | Etapas inactivas de las bacterias, con un recubrimiento protector grueso que permite que las bacterias sobrevivan en condiciones ambientales adversas. |
| Esporas de moho | Diminutas estructuras reproductivas que son producidas por moho. |
| Filtro de aire (Air filter) | Un dispositivo que elimina material particulado de una corriente de aire. |
| Filtro de aire de material fibroso (Fibrous media air filter) | Un tipo de filtro de aire que elimina partículas capturándolas con materiales de fibra fibrosos. |
| Filtro HEPA (Filtro de alta eficiencia para partículas en el aire) [HEPA (high-efficiency particulate air) filter] | Un filtro de aire con una superficie mecánica extendida que tiene una eficiencia de eliminación de partículas mínima fraccional del 99.97 por ciento para partículas de 0.3 μm de diámetro, con alta eficiencia para partículas de mayor y menor tamaño. |
| Ionizador (purificador de aire) [Ionizer (air cleaner)] | Un dispositivo de purificación de aire que usa un cable de alto voltaje o escobillas de fibra de carbón para cargar eléctricamente las moléculas del aire, lo cual produce iones negativos a los que las partículas suspendidas en el aire se adhieren y a su vez se cargan. Las partículas con carga pueden adherirse a superficies cercanas como muros o muebles, o entre ellas, y caer más rápido. También puede decirse que son “generadores de iones”. |
| Luz ultravioleta (UV) (Ultraviolet light) | Una radiación electromagnética con una longitud de onda de entre 10 nm a 400 nm (más corta que la luz visible pero más larga que los Rayos-X). |
| Medios de filtración electret (Electret media) | Medios de filtración de material fibroso con una carga electrostática aplicada inicialmente para mejorar la captura de partículas. |
| Oxidación fotocatalítica (PCO) (Photocatalytic oxidation) | Una tecnología de limpieza del aire que usa un material de área de superficie grande cubierto con un catalítico como el dióxido de titanio que adsorbe y reacciona con los contaminantes gaseosos cuando se irradia con luz ultravioleta. |
| Ozono (Ozone) | Símbolo químico O ₃ ; Un alótropo inestable de oxígeno que se forma naturalmente del oxígeno atmosférico por descargas eléctricas o por exposición a la radiación ultravioleta y que también es producido en la atmósfera baja por reacción fotoquímica de ciertos contaminantes. Es venenoso en concentraciones suficientemente altas. |
| Partícula (Particle) | Una discreta pequeña masa de materia sólida o líquida que se mantiene individualmente dispersa en emisiones de gases o líquidos (generalmente se considera que es un contaminante atmosférico). |

| | |
|--|---|
| Partículas ultrafinas (Ultrafine particles) | Partículas más pequeñas que 0.1 µm. |
| Precipitador electrostático (ESP) (Electrostatic precipitator) | Un tipo de tecnología de limpieza del aire mediante un proceso de carga electrostática activa que requiere electricidad para cargar las partículas que son atraídas, y se adhieren, a placas con carga opuesta. |
| Purificador de aire (Air cleaner) | Un dispositivo utilizado para eliminar partículas o impurezas gaseosas del aire; los ejemplos incluyen medios de filtración de material fibroso combinados con un ventilador, materiales sorbentes combinados con un ventilador, precipitador electrostático, generador de iones, purificador de irradiación germicida ultravioleta y purificador por oxidación fotocatalítica. |
| Quimisorción (Chemisorption) | Un proceso por el cual una sustancia se combina con otra a través de la formación de un enlace químico. |
| Radón (Radon) | Un gas radioactivo inodoro e incoloro que se puede encontrar en el aire interior. Es producido por el radio en fuentes naturales como la roca, el suelo, manto freático, gas natural, y materiales de construcción de origen mineral (por ej., placas de granito). A medida que el uranio se descompone, libera radón, que a su vez produce partículas radioactivas de corta duración llamadas “progenie”, algunas de las cuales se adhieren a partículas de polvo. |
| Resistencia al flujo de aire (Airflow resistance) | Ver Bajada de presión. |
| Rinitis (Rhinitis) | Inflamación de las membranas mucosas que recubren la cavidad nasal. |
| Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers] | ASHRAE es una asociación internacional de profesionistas cuyo enfoque son los sistemas de construcción, la eficiencia energética, la calidad del aire interior, la refrigeración y las tecnologías de la sustentabilidad. |
| Sorción (Sorption) | El término común que se usa para las interacciones de adsorción o quimisorción. |
| Tecnología de plasma para limpieza del aire (Plasma air-cleaning technology) | Una tecnología de limpieza del aire que usa una descarga de alto voltaje para ionizar los gases de entrada, lo cual rompe los enlaces químicos y altera químicamente los contaminantes gaseosos. |
| UV-A | Radiación de UV de onda larga (315 a 400 nm). |
| UV-B | Radiación de UV de onda media (280 to 315 nm). |
| UV-C | Radiación de UV de onda corta (100 to 280 nm). |
| Valor Mínimo Reportado de Eficiencia (MERV) (Minimum Efficiency Reporting Value) | Una medida de rendimiento de eficiencia de filtros proveniente de ensayos de laboratorio basados en ASHRAE Standard 52.2. |

REFERENCIAS

- AHAM (Association of Home Appliance Manufacturers). 2015. *ANSI/AHAM AC-1-2015: Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners*. Washington, D.C.: AHAM.
- Alberci RM, Mendes MA, Jardim WF, Eberlin MN. 1998. Mass spectrometry on-line monitoring and MS2 product characterization of TiO₂/UV photocatalytic degradation of chlorinated volatile organic compounds. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry* 9(12):1321–1327.
- Aldred JR, Darling E, Morrison G, Siegel JA, Corsi RL. 2015. Benefit-cost analysis of commercially available activated carbon filters for indoor ozone removal in single-family homes. *Indoor Air* 26(3):501–512.
- Allen RW, Carlsten C, Karlen B, Leckie S, van Eeden S, Vedal S, Wong I, Brauer M. 2011. An air filter intervention study of endothelial function among healthy adults in a woodsmoke-impacted community. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 183:1222–1230. doi:10.1164/rccm.201010-1572OC
- ASHRAE. 2008. (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Chapter 28: Air cleaners for particulate contaminants. In: *2008 ASHRAE Handbook: HVAC Systems and Equipment*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. 2014. *Standard 185.2-2014: Method of Testing Ultraviolet Lamps for Use in HVAC&R Units or* ASHRAE. 2015a. *ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning*. January. Atlanta, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. 2015b. *Standard 185.1-2015: Method of Testing UV-C Lights for Use in Air-Handling Units or Air Ducts to Inactivate Airborne Microorganisms*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. 2015c. *Standard 145.1-2015: Laboratory Test Method for Assessing the Performance of Gas-Phase Air-Cleaning Systems: Loose Granular Media (ANSI Approved)*. Atlanta, GA: ASHRAE. *Air Ducts to Inactivate Microorganisms on Irradiated Surfaces (ANSI Approved)*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. 2016. *Standard 145.2-2016: Laboratory Test Method for Assessing the Performance of Gas-Phase Air Cleaning Systems: Air Cleaning Devices (ANSI Approved)*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Azimi P, Zhao D, Stephens B. 2014. Estimates of HVAC filtration efficiency for fine and ultrafine particles of outdoor origin. *Atmospheric Environment* 98:337–346. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.09.007
- Azimi P, Zhao D, Stephens B. 2016. Modeling the impact of residential HVAC filtration on indoor particles of outdoor origin (RP-1691). *Science and Technology of the Built Environment* 22:431–462. doi:10.1080/23744731.2016.1163239
- Bahri M, Haghghat F. 2014. Plasma-based indoor air cleaning technologies: The state of the art-review. *CLEAN: Soil Air Water* 42:1667–1680.
- Barn P, Larson T, Noullett M, Kennedy S, Copes R, Brauer M. 2008. Infiltration of forest fire and residential wood smoke: An evaluation of air cleaner effectiveness. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 18:503–511. doi:10.1038/sj.jes.7500640

- Bascom R, Fitzgerald TK, Kesavanathan J, Swift DL. 1996. A portable air cleaner partially reduces the upper respiratory response to sidestream tobacco smoke. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 11(6):553–559.
- Batterman S, Du L, Mentz G, Mukherjee B, Parker E, Godwin C, Chin JY, O’Toole A, Robins T, Rowe Z, Lewis T. 2012. Particulate matter concentrations in residences: An intervention study evaluating stand-alone filters and air conditioners: Air filters and air conditioners in homes. *Indoor Air* 22(3):235–252
- Batterman S, Du L, Parker E, Robins T, Lewis T, Mukherjee B, Ramirez E, Rowe Z, Brakefield-Caldwell W. 2013. Use of free-standing filters in an asthma intervention study. *Air Quality, Atmosphere & Health* 6(4):759–767.
- Batterman S, Godwin C, Jia C. 2005. Long duration tests of room air filters in cigarette smokers’ homes. *Environmental Science & Technology* 39:7260–7268.
- Battistoni P, Fava G. 1993. Electrostatic air cleaner in the control of tobacco smoke. *International Journal of Environmental Studies* 44:299–305.
- Bernstein JA, Bobbitt RC, Levin L, Floyd R, Crandall MS, Shalwitz RA, Seth A, Glazman M. 2006. Health effects of ultraviolet irradiation in asthmatic children’s homes. *Journal of Asthma* 43(4):255–262.
- Blake DM, Jacoby WA, Nimlos M. 1993. Identification of by-products and intermediates in the photocatalytic oxidation of gas-phase trichloroethylene. *Proceedings of the 6th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Volume 2*. Madrid, Spain: Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas (CIEMAT).
- Bräuner EV, Forchhammer L, Moller P, Barregard L, Gunnarsen L, Afshari A, Wahlin P, Glasius M, Dragsted LO, Basu S, Raaschou-Nielsen O, Loft S. 2008. Indoor particles affect vascular function in the aged: An air filtration-based intervention study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 177:419–425. doi:10.1164/rccm.200704-632OC
- Brehler R, Kuuting B, Biel K, Luger T. 2003. Positive effects of a fresh air filtration system on hay fever symptoms. *International Archives of Allergy and Immunology* 123(1):60–65.
- Brown KW, Minegishi T, Allen J, McCarthy JF, Spengler JD, MacIntosh DL. 2014. Reducing patients’ exposures to asthma and allergy triggers in their homes: An evaluation of effectiveness of grades of forced air ventilation filters. *Journal of Asthma* 51(6):585–94. doi:10.3109/02770903.2014.895011
- Butz AM, Matsui EC, Breysse P, Curtin-Brosnan J, Eggleston P, Diette G, Williams D, Yuan J, Bernert JT, Rand C. 2011. A randomized trial of air cleaners and a health coach to improve indoor air quality for inner-city children with asthma and secondhand smoke exposure. *Archives of Pediatrics and Adolescent Medicine* 165:741–748. doi:10.1001/archpediatrics.2011.111
- California Code of Regulations. 2009. *Regulation for Limiting Ozone Emissions From Indoor Air Cleaning Devices*. Title 17, Division 3, Chapter 1, Subchapter 8.7, Article 1. www.arb.ca.gov/research/indoor/aircleaners/air-cleaner-regulation.pdf.

- CDC (Centers for Disease Control and Prevention). 2003. *Guidelines for Environmental Infection Control in Health Care Facilities*. Atlanta, GA: CDC.
- Chen HL, Lee HM, Chen SH, Chang MB, Yu SJ, Li SN. 2009. Removal of volatile organic compounds by single-stage and two-stage plasma catalysis systems: A review of the performance enhancement mechanisms, current status, and suitable applications. *Environmental Science & Technology* 43:2216–2227.
- Chen R, Zhao A, Chen H, Zhao Z, Cai J, Wang C, Yang C, Li H, Xu X, Ha S, Li T, Kan H. 2015. Cardiopulmonary benefits of reducing indoor particles of outdoor origin: A randomized, double-blind crossover trial of air purifiers. *Journal of the American College of Cardiology* 65:2279–2287. doi:10.1016/j.jacc.2015.03.553
- Chen W, Zhang J, Zhang Z. 2005. Performance of air cleaners for removing multiple volatile organic compounds in indoor air. *ASHRAE Transactions* 111:1101–1114.
- Chuang H-C, Ho K-F, Lin L-Y, Chang T-Y, Hong G-B, Ma C-M, Liu I-J, Chuang K-J. 2017. Long-term indoor air conditioner filtration and cardiovascular health: A randomized crossover intervention study. *Environmental International* 106:91–96.
- Consumers Union. 2002. Clearing the air: A guide to reducing indoor pollution. *Consumer Reports* 67(2;Feb):41–49.
- Consumers Union. 2003. Air cleaners: Behind the hype. *Consumer Reports* 68(10;Oct):26–29.
- Consumers Union. 2005. New concerns about ionizing air cleaners. *Consumer Reports* 70(5;May):22–25.
- Cruz MD, Christensen JH, Thomasen JD, Muller R. 2014. Can ornamental potted plants remove volatile organic compounds from indoor air? A review. *Environmental Science and Pollution Research* 21(24):13909–13928.
- Cui X, Li F, Xiang J, Fang L, Chung MK, Day DB, Mo J, Weschler CJ, Gong J, He L, Zhu D, Lu C, Han H, Zhang Y, Zhang J. 2018. Cardiopulmonary effects of overnight indoor air filtration in healthy non-smoking adults: A double-blind randomized crossover study. *Environment International* 114:27–36.
- Cundith CJ, Kerth CR, Jones WR, McCaskey TA, Kuhlert DL. 2002. Microbial reduction efficiencies of filtration, electrostatic polarization, and UV components of a germicidal air-cleaning system. *Journal of Food Science* 67(6):2278–2281.
- Custovic A, Simpson A, Pahdi H, Green RM, Chapman MD, Woodcock A. 1998. Distribution, aerodynamic characteristics, and removal of the major cat allergen *Fed d I* in British homes. *Thorax* 53:33–38.
- Darling E, Morrison GC, Corsi RL. 2016. Passive removal materials for indoor ozone control. *Building and Environment* 106:33–44.
- De Blay F, Chapman MD, Platts-Mills AE. 1991. Airborne cat allergen (*Fel d I*): Environmental control with the cat *in situ*. *American Review of Respiratory Disease* 143:1334–1339.

- Destailats H, Lunden MM, Singer BC, Coleman BK, Hodgson AT, Weschler CJ, Nazaroff WW. 2006. Indoor secondary pollutants from household product emissions in the presence of ozone: A bench-scale chamber study. *Environmental Science & Technology* 40(14):4421–8.
- Destailats H, Sleiman M, Sullivan DP, Jacquiod C, Sablayrolles J, Molins L. 2012. Key parameters influencing the performance of photocatalytic oxidation (PCO) air purification under realistic indoor conditions. *Applied Catalysis B: Environmental* 128:159–170.
- Fazli T, Yeap RY, Stephens B. 2015. Modeling the energy and cost impacts of excess static pressure in central forced-air heating and air-conditioning systems in single-family residences in the U.S. *Energy and Buildings* 107:243–253.
- Ferro AR, Kopperud RJ, Hildemann LM. 2004. Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. *Environmental Science & Technology* 38(6):1759–1764.
- Fisk WJ. 2013. Health benefits of particle filtration. *Indoor Air* 23(5):357–368.
- Fisk WJ, Chan WR. 2017a. Effectiveness and cost of reducing particle-related mortality with particle filtration. *Indoor Air* (early access March 6). doi:10.1111/ina.12371
- Fisk WJ, Chan WR. 2017b. Health benefits and costs of filtration interventions that reduce indoor exposure to PM_{2.5} during wildfires. *Indoor Air* 27(1):191–204.
- Fisk WJ, Faulkner D, Palonen J, Seppanen O. 2003. Particle air filtration in HVAC supply air streams: Performance and cost implications of various methods of reducing indoor concentrations of particles. *HPAC Engineering* 75(7):24–31.
- Francis H, Fletcher G, Anthony C, Pickering C, Oldham L, Hadley E, Custovic A, Niven R. 2003. Clinical effects of air filters in homes of asthmatic adults sensitized and exposed to pet allergens. *Clinical & Experimental Allergy* 33:101–105.
- Girman J, Phillips T, Levin H. 2009 Critical review: How well do house plants perform as indoor air cleaners? *Proceedings of Healthy Buildings 2009*, Paper 667.
- Green R, Simpson A, Custovic A, Faragher B, Chapman M, Woodcock A. 1999. The effect of air filtration on airborne dog allergen. *Allergy* (54):484–488.
- Hanley JT, Ensor DS, Smith DD, Sparks LE. 1994. Fractional aerosol filtration efficiency of in-duct ventilation air cleaners. *Indoor Air* 4:169–178.
- Hanley JT, Owen MK. 2003. *Develop a New Loading Dust and Dust Loading Procedures for the ASHRAE Filter Test Standards 52.1 and 52.2 (1190-RP)*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Henschel B. 1998. Cost analysis of activated carbon versus photocatalytic oxidation for removing organic compounds from indoor air. *Journal of the Air & Waste Management Association* 48(10):985–994.

- Héroux, ME, Clark N, Ryswyk KV, Mallick R, Gilbert NL, Harrison I, Rispler K, Wang D, Anastassopoulos A, Guay M, MacNeill M, Wheeler AJ. 2010. Predictors of indoor air concentrations in smoking and non-smoking residences. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 7:3080–3099. doi:10.3390/ijerph7083080
- Hodgson AT, Destailats H, Dullivan DP, Fisk WJ. 2007. Performance of ultraviolet photocatalytic oxidation for indoor air cleaning applications. *Indoor Air* 17:305–316.
- Howard-Reed C, Nabinger SJ, Emmerich SJ. 2008. Characterizing gaseous air cleaner performance in the field. *Building and Environment* 43:368–377.
- Howard-Reed C, Wallace LA, Emmerich SJ. 2003. Effect of ventilation systems and air filters on decay rates of particles produced by indoor sources in an occupied townhouse. *Atmospheric Environment* 37:5295–5306. doi:10.1016/j.atmosenv.2003.09.012
- Huang Y, Ho S, Lu Y, Niu R, Xu L, Cao J, Lee S. 2016. Removal of indoor volatile organic compounds via photocatalytic oxidation: A short review and prospect. *Molecules* 21(1):56, 20 pp. doi:10.3390/molecules21010056
- IEC (International Electrotechnical Commission). 2015. *IEC 60335-2-65: Household and Similar Electrical Appliances—Safety—Part 2-65: Particular Requirements for Air-Cleaning Appliances*. Geneva, Switzerland: IEC.
- Institute of Medicine. 2000. *Clearing the Air: Asthma and Indoor Air Exposures*. Washington, D.C.: The National Academies Press.
- ISO (International Organization for Standardization). 2016. *ISO 16890-1:2016: Air Filters for General Ventilation—Part 1: Technical Specifications, Requirements and Classification System Based Upon Particulate Matter Efficiency (ePM)*. December. Geneva, Switzerland: ISO.
- Jakober C, Phillips T. 2008. *Evaluation of Ozone Emissions From Portable Indoor Air Cleaners: Electrostatic Precipitators and Ionizers*. Staff Technical Report. Sacramento, CA: California Air Resources Board.
- James P, Cummings JE, Sonne J, Vieira R, Klengerbo J. 1997. The effect of residential equipment capacity on energy use, demand, and run-time. *ASHRAE Transactions* 103:297–303.
- Kajbafzadeh M, Brauer M, Karlen B, Carlsten C, van Eeden S, Allen RW. 2015. The impacts of traffic-related and woodsmoke particulate matter on measures of cardiovascular health: A HEPA filter intervention study. *Occupational and Environmental Medicine* 72:394–400. doi:10.1136/oemed-2014-102696
- Karotki DG, Spilak M, Frederiksen M, Gunnarsen L, Bräuner EV, Kolarik B, Andersen ZJ, Sigsgaard T, Barregard L, Strandberg B, Sallsten G, Møller P, Loft S. 2013. An indoor air filtration study in homes of elderly: Cardiovascular and respiratory effects of exposure to particulate matter. *Environmental Health* 12:116. doi:10.1186/1476-069X-12-116

- Kim H-J, Han B, Kim Y-J, Yoon Y-H, Oda T. 2012. Efficient test method for evaluating gas removal performance of room air cleaners using FTIR measurement and CADR calculation. *Building and Environment* 47:385–393.
- Kowalski WJ, Bahnfleth W. 1998. Airborne respiratory diseases and mechanical systems for control of microbes. *Heating, Piping, and Air Conditioning* 70(7):34–48.
- Kowalski WJ, Bahnfleth W. 2000. UVGI design basics for air and surface disinfection. *Heating, Piping, and Air Conditioning* 7(1):100–110.
- Lanphear BP, Hornung RW, Khoury J, Yolton K, Lierl M, Kalkbrenner A. 2011. Effects of HEPA air cleaners on unscheduled asthma visits and asthma symptoms for children exposed to secondhand tobacco smoke. *Pediatrics* 127:93–101. doi:10.1542/peds.2009-2312
- Lee W-C, Catalano PJ, Yoo JY, Park CJ, Koutrakis P. 2015. Validation and application of the mass balance model to determine the effectiveness of portable air purifiers in removing ultrafine and submicrometer particles in an apartment. *Environmental Science & Technology* 49(16):9592–9599.
- Levetin E, Shaughnessy R, Rogers C, Scheir R. 2001. Effectiveness of germicidal UV radiation for reducing fungal contamination within air-handling units. *Applied and Environmental Microbiology* 67(8):3712–3715.
- Lin L-Y, Chen H-W, Su T-L, Hong G-B, Huang L-C, Chuang K-J, 2011. The effects of indoor particle exposure on blood pressure and heart rate among young adults: An air filtration-based intervention study. *Atmospheric Environment* 45:5540–5544. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.05.014
- Luczynska CM, Li Y, Chapman D, Platts-Mills TAE. 1988. Airborne concentrations and particle size distribution of allergen derived from domestic cats (*Felis domesticus*): Measurements using cascade impactor, liquid impinger and a two site monoclonal antibody assay for *Fel d 1*. Presented at the American Academy of Allergy Annual Meeting, Los Angeles, CA, March 4.
- Luongo JC, Miller SL. 2016. Ultraviolet germicidal coil cleaning: decreased surface microbial loading and resuspension of cell clusters. *Building and Environment* 105:50–55.
- MacIntosh DL, Minegishi T, Kaufman M, Baker BJ, Allen JG, Levy JI, Myatt TA. 2010. The benefits of whole-house in-duct air cleaning in reducing exposures to fine particulate matter of outdoor origin: A modeling analysis. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 20:213–224. doi:10.1038/jes.2009.16
- MacIntosh DL, Myatt TA, Ludwig JF, Baker BJ, Suh HH, Spengler JD. 2008. Whole house particle removal and clean air delivery rates for in-duct and portable ventilation systems. *Journal of the Air & Waste Management Association* 58:1474–1482.
- Melandari C, Tarrani G, Prodi V, De Zaiacomo T, Formignani M, Lombardi, CC. 1983. Deposition of charged particles in the human airways. *Journal of Aerosol Science* 14:184–186.

- Menzies D, Popa J, Hanley JA, Rand T, Milton DK. 2003. Effect of ultraviolet germicidal lights installed in office ventilation systems on workers' health and wellbeing: Double-blind multiple crossover trial. *The Lancet* 362:1785–1791.
- Miller JF, Rodberg JA, Keller GH. 1991. *Benzene Adsorption Onto Activated Carbon and Benzene Destruction by Potassium Permanganate-Loaded Alumina*. South Charleston, WV: Union Carbide Chemicals and Plastics Company.
- Mo J, Zhang Y, Xu Q, Lamson JJ, Zhao R. 2009. Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: A literature review. *Atmospheric Environment* 43:2229–2246.
- Molgaard B, Koivisto AJ, Hussein T, Hameri K. 2014. A new clean air delivery rate test applied to five portable air cleaners. *Aerosol Science and Technology* 48:409–417.
- Montgomery JF, Reynolds COC, Rogak SN, Green SI. 2015. Financial implications of modifications to building filtration systems. *Building and Environment* 85:17–28.
- Morawska L, Agranovski V, Ristovski Z, Jamriska M. 2002. Effect of face velocity and the nature of aerosol on the collection of submicrometer particles by electrostatic precipitator. *Indoor Air* 12:129–137. doi:10.1034/j.1600-0668.2002.09136.x
- Morrison G, Shaughnessy R, Siegel JA. 2014. *In-Duct Air Cleaning Devices: Ozone Emission Rates and Test Methodology*. March 31. Sacramento, CA: California Air Resources Board and California Environmental Protection Agency.
- Myatt TA, Minegishi T, Allen JG, MacIntosh DL. 2008. Control of asthma triggers in indoor air with air cleaners: A modeling analysis. *Environmental Health* 7:43. doi:10.1186/1476-069X-7-43
- NAFA (National Air Filtration Association). 2007. *NAFA Guide to Air Filtration, Fourth Edition*. Virginia Beach, VA: NAFA.
- Offermann FJ, Loisell SA, Sextro RG. 1992. Performance of air cleaners in a residential forced air system. *ASHRAE Journal* July 1992, 51–57.
- Offermann FJ, Sextro RG, Fisk WJ, Grimsrud DT, Nazaroff WW, Nero AV, Revzan KL, Yater J. 1985. Control of respirable particles in indoor air with portable air cleaners. *Atmospheric Environment* 19(11):1761–1771.
- Ongwandee M, Kruewan A. 2013. Evaluation of portable household and in-care air cleaners for air cleaning potential and ozone-initiated pollutants. *Indoor and Built Environment* 22(4):659–668.
- Owen K, Pope R, Hanley J. 2013. How do pressure drop, efficiency, weight gain, and loaded dust composition change throughout filter lifetime (1360-RP)? *ASHRAE Transactions* 120(1):366–381.
- Park H-K, Cheng K-C, Tetteh AO, Hildemann LM, Nadeau KC. 2017. Effectiveness of air purifier on health outcomes and indoor particles in homes of children with allergic diseases in Fresno, California: A pilot study. *Journal of Asthma* 54(4):3441–346. doi:10.1080/02770903.2016.1218011

- Paulin LM, Diette GB, Scott M, McCormack MC, Matsui EC, Curtin-Brosnan J, Williams DL, Kidd-Taylor A, Shea M, Breyse PN, Hansel NN. 2014. Home interventions are effective at decreasing indoor nitrogen dioxide concentrations. *Indoor Air* 24:416–424. doi:10.1111/ina.12085
- Peck RL, Grinshpun SA, Yermakov M, Rao MB, Reponen T. 2016. Efficiency of portable HEPA air purifiers against traffic related ultrafine particles. *Building and Environment* 98:21–29.
- Padró-Martínez L, Owusu E, Reisner E, Zamore W, Simon M, Mwamburi M, Brown C, Chung M, Brugge D, Durant J. 2015. A randomized cross-over air filtration intervention trial for reducing cardiovascular health risks in residents of public housing near a highway. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12:7814–7838. doi:10.3390/ijerph120707814
- Philips Lighting. 1985. *Germicidal Lamps and Applications*. Amsterdam, The Netherlands: Philips Lighting.
- Philips Lighting. 1992. *Disinfection by UV-Radiation*. Amsterdam, The Netherlands: Philips Lighting.
- Pope III CA, Dockery DW. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association* 56(6):709–742.
- Poppendieck DG, Rim D, Persily AK. 2014. Ultrafine particle removal and ozone generation by in-duct electrostatic precipitators. *Environmental Science & Technology* 48:2067–2074.
- Proctor J. 2012. Residential AC filters. *ASHRAE Journal* 48(Oct):92–93.
- Proctor J, Chitwood R, Wilcox B. 2011. *Efficiency Characteristics and Opportunities for New California Homes*. CEC-500-2012-062. March. Sacramento, CA: California Energy Commission.
- Qian J, Ferro AR. 2008. Resuspension of dust particles in a chamber and associated environmental factors. *Aerosol Science and Technology* 42(7):566–578.
- Ramanathan K, Debler VL, Kosusko M, Sparks LE. 1988. Evaluation of control strategies for volatile organic compounds in indoor air. *Environmental Progress* 7(4):230–235.
- Sarwar G, Corsi R, Allen D, Weschler C. 2003. The significance of secondary organic aerosol formation and growth in buildings: Experimental and computational evidence. *Atmospheric Environment* 37(9–10):1365–81.
- Scheir R, Fencel F. 1996. Using UVC technology to enhance IAQ. *Heating, Piping, and Air Conditioning* 68:109–117.
- Shao D, Du Y, Liu S, Brunekreef B, Meliefste K, Zhao Q, Chen J, Song X, Wang M, Wang J, Xu H, Wu R, Wang T, Feng B, Lung CS, Wang X, He B, Huang W. 2017. Cardiorespiratory responses of air filtration: A randomized crossover intervention trial in seniors living in Beijing: Beijing Indoor Air Purifier Study, BIAPSY. *Science of the Total Environment* 6-3–604:541–549. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.06.095
- Shaughnessy RJ, Levetin E, Blocker J, Sublette KL. 1994. Effectiveness of portable indoor air cleaners: Sensory testing results. *Indoor Air* 4:179–188.

- Shaughnessy RJ, Sextro RG. 2006. What is an effective portable air-cleaning device? A review. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 3:169–181.
- Sidheswaran MA, Destailats H, Cohn S, Fisk WJ. 2012. Energy efficient indoor VOC air cleaning with activated carbon fiber (ACF) filters. *Building and Environment* 47:357–367.
- Singer BC, Delp WW, Black DR, Walker infrastructure. 2016. Measured performance of filtration and ventilation systems for fine and ultrafine particles and ozone in an unoccupied modern California house. *Indoor Air* 27(4):780–790. doi:10.1111/ina.12359
- Skulberg KR, Skyberg K, Kruse K, Eduard W, Levy F, Kongerud J, Djupesland P. 2005. The effects of intervention with local electrostatic air cleaners on airborne dust and the health of office employees. *Indoor Air* 15(3):152–159.
- Soreanu G, Dixon M, Darlington D. 2013. Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants—a mini-review. *Chemical Engineering Journal* 229:585–594.
- Stephens B. 2015. Building design and operational choices that impact indoor exposures to outdoor particulate matter inside residences. *Science and Technology of the Built Environment* 21:3–13. doi:10.1080/10789669.2014.961849
- Stephens B. 2018. Evaluating the sensitivity of the mass-based particle removal calculations for HVAC filters in ISO 16890 to assumptions for aerosol distributions. *Atmosphere* 9(3):85. doi:10.3390/atmos9030085.
- Stephens B, Siegel JA. 2012. Comparison of test methods for determining the particle removal efficiency of filters in residential and light-commercial central HVAC systems. *Aerosol Science and Technology* 46:504–513. doi:10.1080/02786826.2011.642825
- Stephens B, Siegel JA. 2013. Ultrafine particle removal by residential HVAC filters. *Indoor Air* 23:488–497. doi:10.1111/ina.12045
- Stephens B, Siegel JA, Novoselac A. 2010. Energy implications of filtration in residential and light-commercial buildings (RP-1299). *ASHRAE Transactions* 116(10):346–357.
- Sublett JL. 2011. Effectiveness of air filters and air cleaners in allergic respiratory diseases: A review of the recent literature. *Current Allergy and Asthma Reports* 11:395–402.
- Sulser C, Schulz G, Wagner P, Sommerfeld C, Keil T, Reich A, Wahn U, Lau S. 2009. Can the use of HEPA cleaners in homes of asthmatic children and adolescents sensitized to cat and dog allergens decrease bronchial hyperresponsiveness and allergen contents in solid dust? *International Archives of Allergy and Immunology* 148:23–30. doi:10.1159/000151502
- Sultan ZM, Nilsson GJ, Magee RJ. 2011a. Removal of ultrafine particles in indoor air: Performance of various portable air cleaner technologies. *HVAC&R Research* 17:513–525.

Tompkins DT, Lawnicki BJ, Zeltner WA, Anderson MA. 2005a. Evaluation of photocatalysis for gas-phase air cleaning—Part 1: Process, technical and sizing considerations (RP-1134). *ASHRAE Transactions* 111(Pt. 2):60–84.

Tompkins DT, Lawnicki BJ, Zeltner WA, Anderson MA. 2005b. Evaluation of photocatalysis for gas-phase air cleaning—Part 2: Economics and utilization (RP-1134). *ASHRAE Transactions* 111(Pt. 2):85–95.

Tronville P, Rivers R. 2016. New Method for Testing Air Filter Performance. *ASHRAE Journal* May 2016: 14–25.

Turchi CS, Rabago R, Jassal A. 1995. *Destruction of Volatile Organic Compound (VOC) Emissions by Photocatalytic Oxidation (PCO): Benchscale Test Results and Cost Analysis*. Technology Transfer #95082935A-ENG. Austin, TX: SEMATECH Technology Transfer.

UL. 2011. *UL Standard 876: Electrostatic Air Cleaners also covering Ion Generators, Static Neutralizing Equipment, and Power Supplies for Electrostatic Air-cleaning Equipment*. Northbrook, IL: UL.

U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1995. *The Inside Story: A Guide to Indoor Air Quality*. U.S. Environmental Protection Agency. EPA 402-K-93-007. April. Washington, D.C.: EPA.

U.S. EPA. 2001. *Mold Remediation in Schools and Commercial Buildings*. EPA 402-K-01-001. March. Washington, D.C.: EPA, Office of Air and Radiation, Office of Radiation and Indoor Air, Indoor Environments Division.

U.S. EPA. 2006. *Consumer's Guide to Radon Reduction*. EPA 402-K-06-094 (Revised December 2006). Washington, D.C.: EPA.

U.S. EPA. 2008. *Development of Performance Data for Common Building Air Cleaning Devices: Final Report*. EPA/600/R-08/013. December. Research Triangle Park, NC: EPA, Office of Research and Development, National Homeland Security Research Center.

U.S. EPA. 2009. *Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter* (Final Report, December 2009). EPA 600-R-08-139F. Washington, D.C.: EPA

U.S. EPA. 2009b. *Residential Air Cleaners: A Summary of Available Information, Second Edition*. EPA 402-F-09-002. August. Washington, D.C.: EPA, Office of Air and Radiation, Office of Radiation and Indoor Air, Indoor Environments Division.

U.S. EPA. 2014. *Ozone Generators that are Sold as Air Cleaners: An Assessment of Effectiveness and Health Consequences*. August. Cincinnati, OH: EPA National Center for Environmental Publications. www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/ozone_generator.pdf.

Van der Heide S, Alderen WMC, Kauffman HF, Dubois AEJ, de Monchy JGR. 1999. Clinical effects of air cleaners in homes of asthmatic children sensitized to pet allergens. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 104(2):447–451.

- Van Durme J, Dewulf J, Demeestere K, Leys C, Van Langenhove H. 2009. Post-plasma catalytic technology for the removal of toluene from indoor air: Effect of humidity. *Applied Catalysis B: Environmental* 87:78–83.
- VanOsdell D, Foarde K. 2002. *Defining the Effectiveness of UV Lamps Installed in Circulating Air Ductwork*. ARTI- 21CR/610-40030-01. Research Triangle Park, NC: RTI International (for the Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute).
- VerShaw J, Siegel JA, Chojowski DB, Nigro PJ. 2009. Implications of filter bypass. *ASHRAE Transactions* 115(1):191–198.
- Walker IS, Dickerhoff DJ, Faulker D, Turner WJN. 2013. *Energy Implications of In-Line Filtration in California*. LBNL-6143E. February. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Wallace L, Emmerich SJ, Howard-Reed C. 2004. Effect of central fans and in-duct filters on deposition rates of ultrafine and fine particles in an occupied townhouse. *Atmospheric Environment* 38:405–413. doi:10.1016/j.atmosenv.2003.10.003
- Wang S, Ang HM, Tade MO. 2007. Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: State of the art. *Environment International* 33(5):694–705.
- Wang Y, Sekhar C, Bahnfleth W, Cheong KW, Firrantello J. 2016a. Effects of ultraviolet coil irradiation systems on air-side heat transfer coefficient and low ΔT syndrome in a hot and humid climate. *Science and Technology for the Built Environment* 23(4):582–593.
- Wang Y, Sekhar C, Bahnfleth W, Cheong KW, Firrantello J. 2016b. Effectiveness of an ultraviolet germicidal irradiation system in enhancing cooling coil energy performance in a hot and humid climate. *Energy and Buildings* 130:321–329.
- Wargocki P, Wyon DP, Lyng-Jensen K, Bornehag CG. 2008. The effects of electrostatic particle filtration and supply-air filter condition in classrooms on the performance of schoolwork by children (RP-1257). *HVAC&R Research* 14:327–344.
- Waring MS. 2014. Secondary organic aerosol in residences: Predicting its fraction of fine particle mass and determinants of formation strength. *Indoor Air* 24:376–89.
- Waring MS. 2016. Bio-walls and indoor house plants: Facts and fictions. Presented at the Microbiomes of the Built Environment: From Research to Application Meeting #3, Irvine, CA, October 17–18. nas-sites.org/builtmicrobiome/files/2016/07/Michael-Waring-FOR-POSTING.pdf.
- Waring MS, Siegel JA. 2008. Particle loading rates for HVAC filters, heat exchangers, and ducts. *Indoor Air* 18(3):209–224.
- Waring MS, Siegel JA, Corsi RL. 2008. Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners. *Atmospheric Environment* 42(20):5003–5014.
- Weichenthal S, Mallach G, Kulka R, Black A, Wheeler A, You H, St-Jean M, Kwiatkowski R, Sharp D. 2013. A randomized double-blind crossover study of indoor air filtration and acute changes in cardiorespiratory health in a First Nations community. *Indoor Air* 23:175–184. doi:10.1111/ina.12019

Weschler CJ. 2000. Ozone in indoor environments: Concentration and chemistry. *Indoor Air* 10(4):269–88.

Weschler CJ. 2006. Ozone's impact on public health: Contributions from indoor exposures to ozone and products of ozone-initiated chemistry. *Environmental Health Perspectives* 114(10):1489–1496.

Weschler CJ, Shields HC. 1999. Indoor ozone/terpene reactions as a source of indoor particles. *Atmospheric Environment* 33(15):2301–12.

Wood RA. 2002. Air-filtration devices in the control of indoor allergens. *Current Allergy and Asthma Reports* 2:397–400.

Wood RA, Johnson EF, Van Natta ML, Chen PH, Eggleston PA. 1998. A placebo-controlled trial of a HEPA air cleaner in the treatment of cat allergy. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 158:115–120.

Xu P, Peccia J, Fabian P, Martyny JW, Fennelly KP, Hernandez M, Miller SL. 2002. Efficacy of ultraviolet germicidal irradiation of upper room air in inactivating airborne bacterial spores and mycobacteria in full scale studies. *Atmospheric Environment* 37:405–419.

Xu Y, Raja S, Ferro AR, Jaques PA, Hopke PK, Gressani C, Wetzel LE. 2010. Effectiveness of heating, ventilation and air conditioning system with HEPA filter unit on indoor air quality and asthmatic children's health. *Building and Environment* 45:330–337. doi:10.1016/j.buildenv.2009.06.010

Zhao D, Azimi P, Stephens, B. 2015. Evaluating the long-term health and economic impacts of central residential air filtration for reducing premature mortality associated with indoor fine particulate matter (PM_{2.5}) of outdoor origin. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12:8448–8479.

Zhong L, Haghghat F. 2015. Photocatalytic air cleaners and materials technologies—Abilities and limitations. *Building and Environment* 91:191–203.

Zorn ME. 2003. Photocatalytic oxidation of gas-phase compounds in confined areas: investigation of multiple components systems. *Proceedings of the 13th Annual Wisconsin Space Conference*, Green Bay, WI, August 14–15.

Zorn ME, Tompkins DT, Zeltner WA, Anderson MA. 1999. Photocatalytic oxidation of acetone vapor on TiO₂/ZrO₂ thin films. *Applied Catalysis B: Environmental* 23:1–8.

