

INFORME DEL GTM¹: EQUIPOS AUTÓNOMOS PARA LA LIMPIEZA DEL AIRE Y SENSORES PARA EL CONTROL DE LA TRANSMISIÓN DE SARS-CoV-2 POR AEROSOLES

Informe elaborado por Manuel Ruiz de Adana (U. de Córdoba), Elena Jiménez (U. de Castilla-La Mancha), José Luis Jiménez (U. of Colorado), María Cruz Minguillón (CSIC), Javier Ballester (U. de Zaragoza) y Xavier Querol (CSIC), con la colaboración del GTM

Fecha: 27 abril 2021

Estructura del Informe

[0. Resumen ejecutivo respondiendo brevemente a las preguntas](#)

[1. Introducción](#)

[2. Tecnologías de limpieza de aire](#)

[2.1. Filtración. Filtros HEPA y otros tipos de filtros](#)

[2.2. Ultravioleta C \(UVC\)](#)

[2.3. Otras tecnologías](#)

[3. Acciones de regulación de mercado y seguridad de uso por usuarios de equipos LA](#)

[3.1. Actuaciones relativas a certificación de equipos](#)

[3.2. Actuaciones relativas a la regulación del mercado y uso de equipos LA](#)

[3.3. Actuaciones relativas a la información de la calidad de aire interior para el usuario](#)

[4. Sensores](#)

[4.1 Sensores de detección de virus en el aire](#)

[4.2 Sensores de aerosoles](#)

[4.3 Sensores de dióxido de carbono, CO₂](#)

[Referencias](#)

[Anexo I. Resumen de las tecnologías empleadas en los limpiadores de aire \[EPA 2018\]](#)

[Anexo II. Métrica de equipos LA](#)

[Anexo III. Normativa de ensayos experimentales de equipos LA](#)

[Anexo IV. Riesgos derivados del uso de equipos LA](#)

¹ El Grupo de Trabajo Multidisciplinar (GTM) asesora y apoya al Ministerio de Ciencia e Innovación en materias científicas relacionadas con la COVID-19 y sus consecuencias futuras. El GTM está compuesto por: José M. Ordovás (Presidente), Mariano Esteban, Rocío García-Retamero, Beatriz González LópezValcárcel, Alfonso Gordaliza, Marco Inzitari, Pedro Jordano, Itziar de Lecuona, Laura M. Lechuga, Ramón López de Mántaras, José Molero, Agustín Portela, Diego Puga, José Javier Ramasco, Francisco Sánchez Madrid y Alfonso Valencia. Enric Banda actúa como observador, y Maria Sol Serrano Alonso como secretaria. Todos los componentes del GTM colaboran de forma desinteresada con el Ministerio de Ciencia e Innovación.

0. Resumen ejecutivo respondiendo brevemente a las preguntas

0.1.- ¿Qué sistemas de filtrado/desinfección de aire necesitamos para dar confianza en lugares cerrados? ¿Qué normativa debería aprobarse?

Para minimizar el riesgo de contagio hay que reducir la cantidad de virus presente en el aire, o potencialmente presente. Debido a la posible presencia de personas no solo infectadas sino también pre-sintomáticas, asintomáticas u oligosintomáticas, se debe actuar como si todas las personas fueran potencialmente infecciosas. El objetivo, por tanto, es reducir al máximo la cantidad de aerosoles exhalados por las personas que se encuentran en un espacio con el aire compartido y que otras personas puedan respirar.

Esto se puede conseguir fundamentalmente de dos formas: a) reemplazando el aire interior por aire exterior, mediante ventilación natural o mecánica; b) filtrando el aire, mediante equipos autónomos (los denominados limpiadores de aire) o mediante filtros en el sistema central de aire acondicionado. La filtración es el sistema más eficaz y sin efectos secundarios para la eliminación de virus presentes en el aire. El uso de ultravioleta germicida (UV) es un sistema eficaz, pero el diseño, la instalación y el mantenimiento de esta tecnología son complejos. Si se usan sistemas de UV, se deben instalar en el techo, donde son más eficaces que en los conductos.

El uso de otras tecnologías que inactivan al virus a través de reacciones químicas genera (o puede generar, salvo que se demuestre lo contrario) compuestos peligrosos para la salud y nanopartículas, que solo se pueden detectar con instrumentación muy avanzada disponible en pocos laboratorios académicos en España. Los fabricantes de estas tecnologías suelen afirmar que no generan subproductos, cuando es muy probable que sí lo hagan, aunque no sean capaces de detectarlos en este momento dada la limitación de los equipos que utilizan para ello.

No es recomendable emplear la dispersión de desinfectantes en el aire, como ozono, peróxido de hidrógeno, ácido hipocloroso o alcohol. Las mismas reacciones químicas de estos desinfectantes con las biomoléculas del virus se producen también con las biomoléculas de nuestro aparato respiratorio, ojos, etc. Por ello, estos sistemas tienen efectos negativos comprobados o potenciales sobre la salud humana y deben evitarse por el principio de precaución.

En España, la normativa sobre filtros de aire es muy completa. Por una parte, tenemos la norma UNE-EN ISO 16890-1:2017 Filtros de aire utilizados en ventilación general, que establece una clasificación y metodología de ensayo para el uso de ese tipo de filtros. Por otra parte, están las normas para filtros absolutos o filtros de muy alta eficacia UNE-EN 1822-1:2020 Filtros absolutos (EPA, HEPA y ULPA). Sin embargo, en lo referente a equipos de limpieza de aire, conviene revisar y actualizar la normativa relativa a la determinación de la eficacia de filtrado, así como la referente a los ensayos para determinar su inocuidad y la posible emisión de subproductos indeseados y con potencial impacto en la salud humana.

Numerosos estudios han demostrado que el muestreo por filtración, con cualquier tipo de filtro, no acumula virus con propiedades viables (infectivas), ya que el flujo de aire deseca los aerosoles retenidos y termina por eliminar su viabilidad. Por tanto, un filtro HEPA en un equipo limpiador retiene el virus y lo inactiva con muy alta probabilidad sin necesidad de germicidas.

0.2.- Si hubiera un detector de virus en tiempo semi-real ¿qué diferencias en las medidas de control podrían aceptarse? ¿Estamos cerca de tenerlo?

Si se detectara el virus SARS-CoV-2 en el aire en tiempo real, se podría evacuar el local y/o ajustar las medidas para su eliminación en tiempo real; es decir, cuando la concentración de virus fuera demasiado alta, se podría 1) aumentar la renovación de aire (natural o mecánicamente) y 2) aumentar el caudal de aire filtrado para eliminación de aerosoles.

Se viene dedicando un gran esfuerzo investigador y de financiación al desarrollo de estas tecnologías, por ejemplo, por razones de bioterrorismo (anthrax, etc.). Según nuestro conocimiento, se están empezando a comercializar biosensores que dicen poder detectar selectivamente la presencia del virus SARS-CoV-2 en el aire en tiempo real. Sin embargo, su coste actual es muy alto (del orden de \$20000 por biosensor, más mantenimiento y reactivos) y no hay evaluaciones independientes revisadas por pares de su funcionamiento en condiciones reales, más allá de las aportadas por la propia empresa que los comercializa. Conseguir que este tipo de biosensores funcionen en el mundo real con bajos límites de detección es un gran reto debido a su elevada complejidad técnica. Esto se debe a que las técnicas utilizadas hasta ahora para la detección no son específicas para cada virus, sino para detectar bio-componentes determinados que pueden estar presentes, no solo en los virus, sino también en bacterias, hongos y polen, los cuales además están en concentraciones muy superiores a los virus.

Sin embargo, sí existen en el mercado sensores de gases de bajo coste (entre 100 y 200 euros) que permiten conocer la cantidad de aire exhalado por personas en un espacio interior, que está directamente relacionada con la potencial presencia de virus en el aire. Se trata de los sensores de CO₂ con tecnología de infrarrojo no dispersivo (NDIR, *Non-dispersive infrared*). Estos sensores funcionan correctamente y rápidamente (1 minuto) y constituyen la mejor aproximación de la que se dispone ahora mismo. Es muy importante tener en cuenta que estos sensores son muy útiles para controlar y asegurar proporciones de ventilación adecuadas, pero no para controlar la eficacia de filtración en espacios donde no debe aplicarse la ventilación o no hay posibilidad de aplicarla, ya que el aire filtrado se recircula y acumula CO₂ exhalado. El uso de medidores de CO₂ con sensores NDIR para medir la cantidad de CO₂ en ambientes interiores de pública concurrencia, como restaurantes, bares, comercios, centros comerciales, gimnasios, aulas, etc. es muy recomendable para garantizar la calidad del aire tanto para empleados como para clientes.

0.3.- ¿Se puede concebir al menos un detector o visualizador de aerosoles?

Existe instrumentación para medir la concentración de aerosoles en tiempo real, pero los aerosoles que se encuentran en el aire en un ambiente interior provienen de muchos orígenes diferentes: emisiones de cocina, tabaco, velas, de tráfico del exterior, de resuspensión de polvo, de formación reciente por reacciones en el aire a partir de emisiones gaseosas (compuestos orgánicos volátiles procedentes de productos de limpieza, de pintura, de materiales plásticos, de las personas, etc.). Los aerosoles exhalados por las personas son un porcentaje realmente muy bajo del total de aerosoles presentes. Los estudios científicos para cuantificarlos se realizan en salas ultra-limpias, dado que en habitaciones normales son extremadamente difíciles de detectar al estar mezclados con los aerosoles de otras fuentes. Por tanto, la concentración total de aerosoles en el aire en un espacio no se puede usar como indicador de riesgo de contagio.

1. Introducción

La acumulación de evidencias científicas que avalan la vía de transmisión del SARS-CoV-2 por aerosoles (ver [Greenhalgh et al. 2021]), acompañadas de diversos pronunciamientos de grupos de personalidades del mundo de la Ciencia, ha despertado el interés y la preocupación de la ciudadanía y de las administraciones públicas por la mejora de la calidad del aire en espacios interiores, convirtiéndolo en una prioridad de actuación. El GTM emitió un informe sobre este tema en los primeros meses de la pandemia [GTM 2020], que fue seguido por otro encargado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) [MICINN 2020].

La calidad del aire interior puede verse afectada por contaminantes gaseosos y por aerosoles, también descritos como partículas o material particulado, tanto de origen biológico como no biológico. Entre los contaminantes ambientales cabe resaltar los siguientes:

- Aerosoles, con tres orígenes principales: i) emitidos por fuentes interiores antropogénicas (respiratorias y por actividades humanas en general) y biogénicas; ii) infiltrados de la contaminación exterior; y iii) ultrafinos generados en el interior a partir de la oxidación de gases emitidos tanto del exterior como del interior. Caben destacar dos tipos particulares:
 - Microorganismos: bacterias, hongos (predominantemente mohos) y virus.
 - Alérgenos: pelo animal, polen, etc.
- Gases contaminantes como: i) óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO) de focos de combustión interiores; ii) compuestos orgánicos volátiles (COVs) emitidos por el uso de detergentes, pinturas, disolventes, ambientadores, emisiones humanas, por materiales en el interior de edificios (muebles, tejidos, plásticos, materiales de construcción) y por reacciones químicas que transforman unos COVs en otros; iii) gases geogénicos como el radón, que se infiltran a través del suelo de los edificios; iv) ozono (O_3) infiltrado desde el exterior o producido en interiores por diferentes equipos electrónicos como impresoras y otros; y v) NO_x y COVs infiltrados desde el exterior.

El control de la calidad del aire interior es muy relevante dado que pasamos la mayor parte de nuestro tiempo en espacios interiores. Las estrategias más efectivas para su mejora deben enfocarse a la reducción de emisiones de las fuentes, seguido del diseño apropiado de los espacios interiores para reducir la contaminación (en particular usando ventilación con aire exterior) y, cuando las dos primeras no sean suficientes, al tratamiento del aire interior mediante tecnologías de limpieza.

En este documento se abordan las **tecnologías de limpieza de aire (LA)**, con un enfoque centrado en la **eliminación de aerosoles y gases**, y se analizan aspectos relacionados con su uso, eficacia y seguridad para las personas. El informe se centra sobre todo en aspectos relacionados con su aplicación a la disminución del riesgo de contagio del SARS-CoV-2 por aerosoles. Es importante remarcar que, aunque en nuestra opinión la vía de transmisión por aerosoles es la prevalente de este virus, tanto la ventilación como el uso de LA no reducen el riesgo por transmisión por spray de gotas macroscópicas (las mal llamadas “gotas de Flugge”), ni por contacto indirecto (fómites). Además, la ventilación y filtración del aire son dos capas de protección que reducen, pero no eliminan completamente el riesgo de contagio. Por estas razones, ni la ventilación ni el uso de LA, suplen en ningún momento la necesidad de utilizar mascarillas y de respetar la distancia física y las normas de higiene en espacios públicos (por ejemplo, mantener distancias entre comensales en un restaurante o que no sirva la bebida más que una persona para cada botella). En todo caso, el orden de prioridad en la actuación sobre el medio aéreo (aparte del control en la persona) sería, en primer lugar, la ventilación (natural o mecánica), en segundo lugar, la filtración de aire (mediante equipos de climatización) y, en tercer lugar, el empleo de equipos autónomos LA (especialmente los basados en filtración de aire).

El alcance de este documento se refiere a los equipos que emplean métodos de limpieza de aire descentralizados o equipos autónomos limpiadores de aire, LA, en inglés "air cleaners". Estos equipos también se conocen habitualmente con el nombre de equipos de purificación de aire, en inglés "air purifiers". En el contexto de este documento se emplea el término equipos limpiadores de aire en vez de equipos de purificación de aire. El informe también aborda el posible uso de **sensores de calidad de aire interior** como indicadores del riesgo de contagio o de mala calidad de aire interior, incluyendo sensores de CO₂ y de aerosoles.

2. Tecnologías de limpieza de aire

Los equipos LA emplean diferentes tecnologías para realizar la limpieza o eliminación de partículas y patógenos del aire. Entre estas tecnologías cabe destacar la filtración de aire, la adsorción física y química de gases, las lámparas de luz ultravioleta germicida, la ionización bipolar, la fotocatalisis y otras tecnologías. Esta revisión se centra en el efecto de las tecnologías LA en la reducción de la cantidad o la actividad de los virus que pueden estar contenidos en aerosoles, para disminuir en lo posible el riesgo de infección por vía aérea del SARS-CoV-2.

Atendiendo a la naturaleza de la metodología utilizada para llevar a cabo la limpieza del aire, las tecnologías LA se pueden clasificar en dos grupos claramente distinguibles: 1) Tratamiento del aire interior eliminando los contaminantes del aire, mediante filtrado (aerosoles) y adsorción (gases) en sustratos filtrantes o adsorbentes por los que se hace fluir el aire interior; y 2) Inactivación a través de reacciones químicas (pero sin quitar el material del aire) de gases contaminantes y patógenos en aerosoles. A modo de avance, a continuación se presenta una visión resumida de ambos tipos de tecnologías:

- Filtración y adsorción:
 - Filtros de uso general para ventilación: retienen aerosoles suspendidos en el aire, incluyendo los contaminantes interiores y exteriores, microorganismos, pelo, polen y otros alérgenos. Si no tienen un grado de filtración oficialmente certificado, su eficacia (porcentaje de partículas/aerosoles por debajo de un tamaño determinado que son capaces de retener) es, a priori, difícilmente evaluable, a la hora de seleccionar un sistema.
 - Filtros de alta eficacia o filtros de aire absolutos EPA (*Efficient Particulate Air*), HEPA (*High Efficiency Particulate Air*), ULPA (*Ultra Low Penetration Air*) u otros: retienen aerosoles en suspensión, incluyendo los finos y ultrafinos. La certificación de acuerdo a la norma UNE-EN 1822-1:2020 dará el porcentaje de su eficacia filtrante para un tamaño de partícula considerado en el ensayo específico. Los dos parámetros, porcentaje de filtración y tamaño, son igualmente relevantes. Por ejemplo, si comparamos los filtros ePM1 50% y ePM2,5 50%, vemos que el primero retiene el 50% de partículas entre 0,3 y 1 micra y el segundo el 50% de partículas entre 0,3 micras y 10 micras. En realidad, el primer filtro es muy superior al segundo, dado que es mucho más fácil filtrar las partículas supermicrónicas. Algunos equipos cuentan con un “prefiltro” antecediendo al filtro HEPA para alargar la vida útil del último.
 - Filtros de carbón activado: adsorben gases contaminantes de muy diversa composición y origen, tanto inorgánicos (NO_x , SO_2 , O_3 , etc.) como orgánicos (formaldehído, acetaldehído, entre otros muchos compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles), con potencial impacto para la salud y causantes de olores. Generalmente, van precedidos de un sistema de filtración que retiene partículas.
- Inactivación química o fotoquímica de contaminantes y patógenos:
 - Lámparas de ultravioleta: inactivan microorganismos presentes en el aire. Pueden generar subproductos como O_3 , radicales hidroxilos (OH) y COV oxidados.
 - Fotocatálisis: Oxida contaminantes químicos y orgánicos en el aire (algunos causantes de malos olores), generando diversos subproductos como O_3 y otros productos derivados de la oxidación de los contaminantes, como ácido nítrico (HNO_3) de la oxidación del NO_2 .
 - Ionización: genera iones, muchos de los cuales se unen a los aerosoles. Una mayor ionización facilita la coagulación de partículas y aumenta su velocidad de deposición por gravedad. La carga electroestática también incrementa la deposición de aerosoles en

superficies por electroforesis. Al ser altamente energéticos, los iones también pueden producir reacciones químicas con los compuestos presentes en los espacios interiores.

- Plasma: usan plasma (gas ionizado y/o con electrones excitados a niveles de energía más altos) para excitar O_2 generando moléculas oxidantes que resultan efectivas frente a microorganismos como bacterias, virus y COVs. Puede generar subproductos como O_3 .
- Dispersión de desinfectantes en el aire, como O_3 , dióxido de cloro, ácido hipocloroso o peróxido de hidrógeno.

Los sistemas del primer tipo son más fácilmente controlables en cuanto a eficacia de reducción de contaminantes y no producen efectos secundarios negativos para la salud que deban ser evaluados o controlados. La mejora inducida por estos equipos en la calidad del aire dependerá principalmente de: i) la capacidad filtrante (o adsorbente) de los equipos y ii) el volumen del espacio interior y el número de ocupantes. Por ello, las dos características clave de estos equipos son el tipo y certificación de filtros (o adsorbentes) y el caudal de aire interior que circulan.

En cuanto a la gran variedad de sistemas del segundo tipo, no todos cuentan con certificaciones o pruebas suficientes de eficacia de reducción de contaminantes y, a veces, éstas están realizadas en condiciones de laboratorio muy alejadas de las que son relevantes en aplicaciones reales. Además, algunos de ellos pueden generar contaminantes procedentes de la inactivación u oxidación de los que se intentan eliminar o de otros contaminantes presentes en el aire, o bien productos derivados de su operación (como O_3 u otros productos químicos como dióxido de cloro, ácido hipocloroso, peróxido de hidrógeno o algunas radiaciones ionizantes) que pueden tener efectos negativos sobre la salud. Particularmente, todas las técnicas basadas en química pueden producir COVs oxidados y aerosoles ultrafinos a través de la nucleación. La certificación de la ausencia de estos efectos secundarios es mucho más compleja y, en muchos casos, se omite o se sustituye por estudios concretos con visiones frecuentemente muy estrechas e incompletas.

Los principales beneficios del uso de equipos LA son: i) reducción del número de partículas y aerosoles suspendidos en el aire, contaminantes gaseosos y microorganismos; ii) reducción de problemas relacionados con alérgenos y asma; y iii) reducción de olores debidos a la eliminación de determinados COVs. No obstante, es importante señalar que no todos los beneficios son aplicables a todos los tipos de equipos, ya que muchos de ellos solamente filtran aerosoles.

En [Pan et al. 2019] se realiza una revisión muy completa de los métodos de muestreo de virus y concluye que el muestreo por filtración con cualquier tipo de filtro elimina las posibilidades de recoger virus con propiedades viables (infectivas), ya que el flujo de aire deseca los aerosoles retenidos y termina por eliminar su viabilidad. En estos casos, se puede determinar la carga de copias genéticas por PCR (*Polymerase Chain Reaction*), pero no es posible cultivar el virus. Esto es reconocido también en muchos otros artículos incluidos en la revisión y posteriores a ella y se describe para muestreos cortos. Para muestrear un virus de forma que se mantenga viable es necesario utilizar equipos de condensación o bien los MD-80 con impactadores sobre Agar y con

muestreos de 10 min como máximo. Por tanto, si un filtro HEPA retiene el virus, éste se inactivará con probabilidad muy alta sin necesidad de germicidas, aunque muy probablemente detectemos copias genéticas si lo analizamos en el laboratorio.

2.1. Filtración. Filtros HEPA y otros tipos de filtros

Los equipos LA basados en filtros de partículas usan un ventilador para impulsar el aire a través de un medio filtrante. El filtro retiene las partículas de forma mecánica por impactación, difusión e interceptación. El efecto de estos tres mecanismos de forma combinada origina la forma característica de la curva de eficacia del filtro en función del tamaño de partícula (ver figura 1), cuyo mínimo se suele alcanzar en el tamaño de partícula/aerosol entre 0,12 y 0,3 micras.

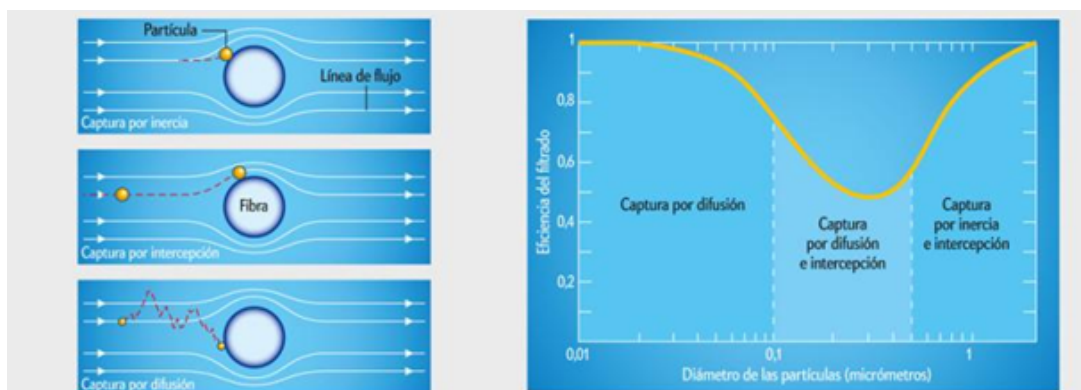


Figura 1. Mecanismos principales de retención de partículas en filtros de aire. Curva de eficacia de filtro en función del tamaño de partícula [Courty 2020].

La eficacia aumenta a medida que aumenta el número de partículas retenidas, dado que estas hacen al filtro más tupido. Simultáneamente, se produce un incremento en la pérdida de presión y, posteriormente, el filtro debe ser sustituido. Los equipos LA basados en filtración han sido estudiados de forma exhaustiva [Zhang 2011], tanto en cámara de ensayos como en campo, y se ha demostrado su eficacia para retener partículas, incluidas gotas (ver [Miller-Leiden 1996], [Kujundzic 2006] y [Curtius et al. 2021]). Sin embargo, los filtros de partículas no retienen los contaminantes gaseosos, para cuya eliminación se requieren filtros de carbón activado o bien otras tecnologías.

Todo equipo LA basado en tecnología de filtración debe tener certificación del tipo de filtro instalado, pues de otro modo su eficacia es dudosa. En España, la clasificación de filtros de partículas se realiza de acuerdo con las normas UNE EN ISO 16890-1:2017 y UNE EN 1822-1:2020. La eficacia de un filtro indica el porcentaje de partículas o aerosoles de un determinado tamaño que retiene. La tabla de la figura 2 recoge las eficacias de filtros convencionales (norma 16890) y filtros de alta eficacia (norma 1822). La norma UNE EN1822:2020 utiliza concentraciones en número de partículas. La norma UNE EN ISO 16890 también utiliza número de partículas para los cálculos, diferenciando entre distintos tamaños de

partícula. La eficacia del filtro expresada como ePM_x es calculada ponderando las eficacias determinadas para cada subrango de tamaño de partículas en función de la distribución de tamaño de partícula normalizada.

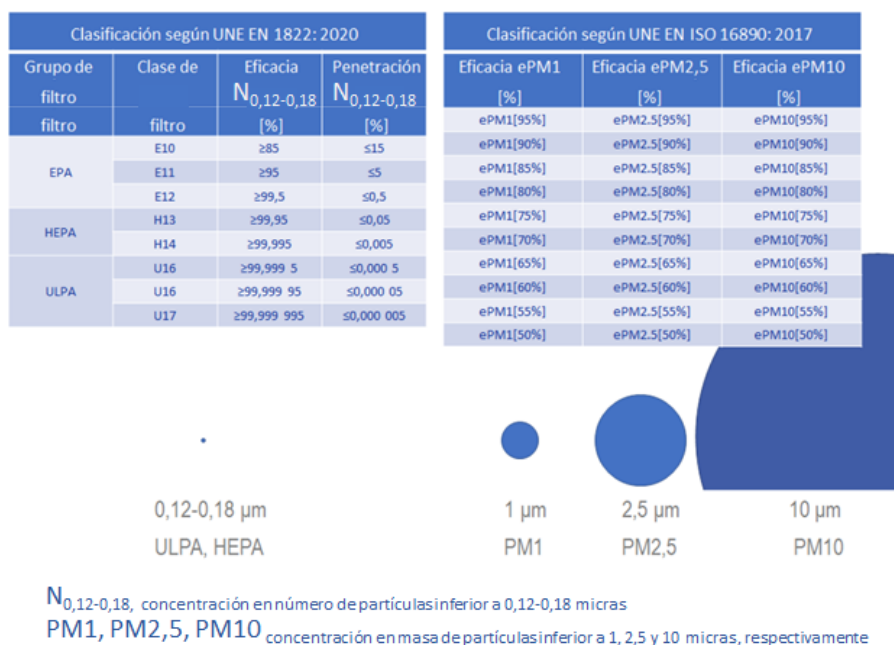


Figura 2. Eficacia de filtros según norma UNE EN 1822-1:2020 y UNE EN ISO 16890-1: 2017 [ATECYR 2020].

En el caso de los filtros de alta eficacia (HEPA), la capacidad de retener partículas o aerosoles es mucho mayor. En este caso, el valor de eficacia indica el porcentaje del número de partículas retenidas por el filtro para el tamaño más desfavorable. El tamaño de partícula más penetrante (MPPS, *Most Penetrating Particle Size*) se encuentra comprendido normalmente en el rango de 0,12 a 0,18 micras. La eficacia del filtro HEPA se obtiene para ese rango de partículas MPPS, es decir, para el valor de eficacia más baja. Eso no indica que el filtro HEPA solamente filtre en ese rango de tamaños, sino que su capacidad filtrante, por debajo y por encima de ese tamaño, es superior al obtenido en ese rango más desfavorable. Es decir, el valor de eficacia que caracteriza un filtro HEPA se establece para el valor de menor eficacia del mismo, que corresponde al tamaño de partícula MPPS [Norma UNE 29463-3:2019 Filtros de alta eficacia].

Los filtros de alta eficacia o filtros HEPA generan una pérdida de presión considerable y, por tanto, un incremento del consumo energético asociado al ventilador. Para un mismo ventilador, un incremento de la pérdida de presión produce una reducción en el caudal volumétrico de aire. Por ese motivo, para valorar la capacidad de retención del equipo LA (*ver más adelante métrica para evaluar LA*) el parámetro más importante no es la eficacia del filtro, sino el producto del caudal de aire y eficacia de filtrado.

Para aplicaciones como la eliminación de SARS-CoV-2 del aire interior compartido, el caudal debe mantenerse al nivel máximo posible para el equipo, pues la renovación de aire filtrado va a depender del caudal del equipo. Muchos equipos están diseñados para reducir la contaminación por aerosoles y cambian a un caudal más bajo automáticamente cuando estos niveles son bajos. Esto no es aplicable a los aerosoles respiratorios, cuyas concentraciones son muy bajas pero están asociadas a riesgos altos de infección. Frecuentemente, los usuarios reducen el caudal para reducir el ruido producido por el equipo. Si el caudal se reduce por cualquier razón, disminuye la tasa de renovación de aire filtrado.

2.2. Ultravioleta C (UVC)

La radiación ultravioleta (UV) es una radiación muy energética que se encuentra en la región espectral de longitudes de onda comprendidas entre 200 y 400 nm (nanómetros). En este intervalo, se distinguen la radiación UVA (de 400 a 315 nm, el intervalo menos energético), la UVB (de 315 a 280 nm) y la UVC (de 280 a 200 nm, intervalo más energético). Esta última, también denominada irradiación con ultravioleta germicida (UVGI, *ultraviolet germicidal irradiation*), al ser la más energética, es capaz de romper los enlaces de algunas moléculas presentes en el agua, el aire o las superficies, inactivando de manera muy efectiva virus, bacterias, moho y hongos al descomponer su ADN o ARN y dejarlos sin capacidad para realizar funciones vitales o reproducirse. Estas propiedades germicidas determinan las importantes capacidades de la tecnología UVC para limpiar y desinfectar una amplia gama de entornos.

Las lámparas germicidas más comunes que emiten radiación UVC tienen un espectro de emisión con un máximo en 254 nm, como se observa en la figura 3. Esta línea de emisión es debida a los vapores de mercurio a baja presión contenidos en un tubo de cuarzo. Las lámparas germicidas que se utilizan en equipos LA para ayudar a esterilizar y limpiar tienen tamaños y formas que les permiten integrarse en estos equipos. Se pueden instalar en el techo (teniendo cuidado de no irradiar a las personas) o en conductos de aire acondicionado, aunque el primer tipo de aplicación suele tener mucha mayor eficiencia dado que puede acceder a una mayor cantidad de aire. En la figura 4 se muestra un ejemplo de una lámpara de techo que incorpora ventilador y luz UV.

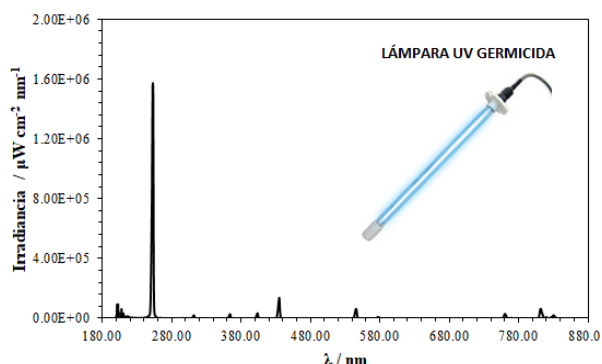


Figura 3. Espectro de emisión de una lámpara germicida (registrado en Universidad de Castilla-La Mancha).

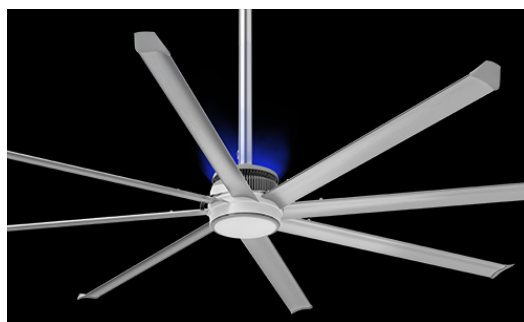


Figura 4. Ventilador de techo que incorpora una lámpara UV.

Algunas esporas bacterianas y de moho son resistentes a la radiación UV y, para lograr una inactivación confiable, la potencia luminosa debe ser alta y los tiempos de exposición largos (del orden de minutos o incluso horas). La eficacia en la eliminación de microorganismos aumenta con la intensidad de la lámpara, que suele ser baja en los LA UVGI. En resumen, la eficacia de los UVGI puede variar dependiendo de la dosis de irradiación UV, el diseño del sistema y aplicación, las características de funcionamiento del sistema y el microorganismo objetivo de la inactivación. Hay que tener en cuenta que la intensidad de las lámparas germicidas no debe ser elevada, ya que la radiación UVC puede fotolizar contaminantes de interior y generar otras especies radicáticas reactivas, como OH si en el ambiente hay, por ejemplo, O_3 o H_2O_2 . También puede fotolizar directamente COVs como acetona o compuestos aromáticos, resultando en la producción de radicales alquilperoxilos (RO_2) y COVs oxidados. Para crear O_3 a partir de un LA basado en tecnología UV, la longitud de onda de la luz de emisión debería estar en el rango de 160-240 nm. El cuarzo estándar transmite parte de esa radiación y se puede generar O_3 en cantidades perjudiciales para la salud.

Algunos aparatos que emplean esta tecnología se combinan con filtros HEPA, lo que ha de hacerse con precaución porque la radiación UV puede deteriorar el filtro si no está bien aislado. De hecho, esta combinación no es necesaria, dado que los aerosoles quedan retenidos en el filtro y los virus pierden infectividad rápidamente en ellos, como se ha descrito en el apartado anterior. Otro inconveniente de esta tecnología, cuando se usa dentro de un equipo LA que ya contiene un filtro HEPA, es que requiere de un mayor consumo de energía eléctrica.

Otro factor a considerar en los dispositivos con tecnología UVC es que, aunque pueden llegar a inactivar los microorganismos, no eliminan las partículas del aire y éstas quedan sin retener, a diferencia de lo que ocurre con otras tecnologías como los filtros HEPA, que sí retienen las partículas que pasan por el filtro.

Recientemente han empezado a estar disponibles diodos de luz ultravioleta de 222 nm, que también poseen propiedades germicidas [Buonanno et al. 2020]. Dado que esta longitud de onda penetra tan solo en la piel o los ojos humanos unas micras, los fabricantes promueven que puede irradiar todo un espacio incluyendo a las personas presentes. Sin embargo, la FDA de EEUU

indica que no hay datos sobre la seguridad de exposición a luz de 222 nm a largo plazo [FDA 2021]. La alta energía de esta radiación puede además incrementar los problemas debidos a la formación de oxidantes como O_3 , COV oxidados y nanopartículas, lo cual no ha sido estudiado.

2.3. Otras tecnologías

Aparte de las tecnologías LA mencionadas en los apartados 2.1 y 2.2, existen otras que permiten reducir o eliminar partículas o gases, o desactivar microorganismos aunque no se elimine el material del aire, que serán descritas en esta sección. En el caso de partículas, abordaremos la precipitación electrostática y los generadores de iones o ionizadores. En el caso de gases, se tratarán la adsorción física o química, la oxidación fotocatalítica, el plasma frío y los generadores de O_3 u ozonizadores. En el **Anexo I** se resumen en una tabla estas tecnologías LA, junto a las basadas en medios filtrantes fibrosos y radiación UVC descritas en los apartados 2.1 y 2.2, respectivamente. En dicha tabla se indica el contaminante del aire interior que elimina (o reduce) cada tecnología, mediante alguno de los siguientes mecanismos de acción: i) retención del contaminante en un medio filtrante o adsorbente; ii) inactivación o eliminación del patógeno; y iii) conversión del gas contaminante en otro.

2.3.1. Precipitación electrostática (*ESP, Electrostatic Precipitation*)

Los precipitadores electrostáticos se emplean comúnmente en la industria para retener partículas de diferentes tipos y tamaños que se generan en determinados procesos industriales. Por ejemplo, se usan en la industria de la madera, del cemento, del papel, en incineradores, calderas de carbón y biomasa, hornos de coque o de vidrio, crackers de petróleo, centrales termoeléctricas, etc. Esta tecnología no es nueva. La primera observación registrada de los fenómenos que son la base de la precipitación electrostática (ESP) industrial la realizó en 1600 el científico inglés W. Gilbert. Sin embargo, hubo que esperar hasta 1908 para que Frederick G. Cottrell patentara el primer precipitador electrostático, cuyo diseño básico no ha cambiado mucho a lo largo de los años.

La precipitación electrostática utiliza uno de los principios básicos de la electricidad y el electromagnetismo: la *atracción electrostática*. Una partícula cargada es atraída hacia una superficie neutra o con carga opuesta (electroforesis), y puede depositarse en esa superficie si hay suficiente atracción (figura 5). Esta tecnología utiliza un electrodo para producir una corona que produce iones que por difusión cargan las partículas (polvo, aceite, humos, etc.). Una vez cargadas, las partículas se mueven naturalmente hacia superficies de carga neutra u opuesta que pueden ser estacionarias, como placas colectoras o conductos, o dinámicas, como otras partículas en la misma corriente de gas. Con este efecto electrostático se pueden lograr altas eficiencias de filtrado, incluso para tamaños de partícula muy pequeños.

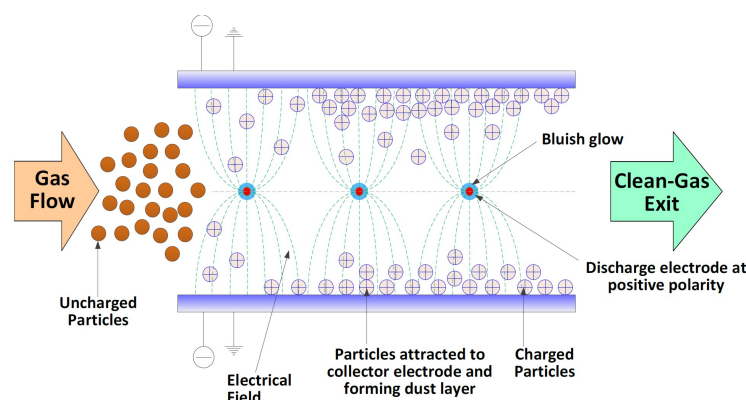


Figura 5. Esquema de principio de funcionamiento de un precipitador electrostático [Afshari 2020].

En la actualidad, se pueden encontrar equipos ESP comerciales en cocinas de restaurantes, donde se producen una gran cantidad de partículas, como humos, vapores de grasa de cocina, etc. Los LA basados en esta tecnología pueden eliminar eficazmente una amplia gama de tamaños de partículas. Según la agencia para la protección del medioambiente americana [EPA 2018], estos equipos tienen la ventaja de causar un impacto mínimo en los sistemas de climatización, pueden ser muy eficientes y tienen una pérdida de carga mínima. Sin embargo, requieren un mantenimiento muy exhaustivo, ya que las placas deben encontrarse muy limpias para no perder eficacia. Otros inconvenientes que presentan son su gran consumo de energía eléctrica y la formación de altas cantidades de O_3 y NO_x . Al estar basados en la formación de iones, comparten los problemas de química no deseada con los ionizadores descritos en el siguiente apartado.

2.3.2. Generadores de iones o ionizadores

Los generadores de iones o *ionizadores* de aire se utilizan en LA para eliminar partículas del aire y para producir reacciones químicas que pueden inactivar patógenos en aerosoles. Su funcionamiento es similar a los ESP pero, en este caso, los iones cargados se dispersan en el aire sin utilizar placas colectoras (véase figura 5). Los iones son generados con un arco de alto voltaje (descarga corona) o un cepillo de fibra de carbono. Estos iones negativos se adhieren a las partículas suspendidas como, por ejemplo, restos de polvo, polen, moho, bacterias y virus. Esto aumenta la velocidad de deposición por electroforesis en superficies interiores. Además pueden aumentar la velocidad de coagulación, lo que puede hacer que crezcan en tamaño y puedan depositarse más fácilmente en superficies cercanas o, si se usan, quedar retenidas en filtros.

Hay dos tipos de ionizadores, según que incorporen o no un ventilador. El ionizador con ventilador lo utiliza para hacer circular el aire con rapidez alrededor de la estancia, por lo que es más ruidoso y consume más energía, mientras que el ionizador sin ventilador distribuye el aire lentamente y tarda más tiempo en actuar, siendo más silencioso y de menor consumo. Una ventaja de estos equipos es que llevan filtros lavables, que pueden ser reemplazables o permanentes, por lo que su mantenimiento es poco costoso.

Una desventaja importante es que algunos ionizadores generan O_3 y, dado que es perjudicial, la producción de este debe ser lo suficientemente baja para poder mantener en el ambiente una concentración inferior a los niveles que se recogen en la normativa. En España se establece un límite de $100 \mu g/m^3$, equivalente a 0,05 ppm, de media octohoraria. Sin embargo, niveles de 0,05 ppm de O_3 todavía son perjudiciales y, por ejemplo, ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) [ASHRAE 2011] recomienda un nivel de O_3 inferior a 0,005 ppm ó 5 ppb (partes por mil millones, billion en inglés). Otro inconveniente de estos LA es que pueden oxidar COVs presentes en el aire y producir COV oxidados más tóxicos. La cobertura máxima de estos equipos suele expresarse para un área específica (en m^2) y se debe indicar la cantidad de iones negativos emitidos por unidad de volumen (normalmente cm^3). Otro inconveniente es que presentan una eficacia baja debido a velocidades de flujo de aire y a tasas o caudales de suministro de aire limpio, CADR (del inglés *Clean Air Delivery Rate*), muy bajas.

Cabe destacar que no hay normativas específicas para estos dispositivos ni en Estados Unidos ni en Europa. Solamente la EPA [EPA 2018] sugiere que el método estándar AHAM AC-1 [ANSI/AHAM AC-1:2006] se puede utilizar para medir el CADR en estos LA.

2.3.3. Adsorción de Gases

El proceso de adsorción es un fenómeno superficial por el cual el gas contaminante queda unido mediante fuerzas de naturaleza física (débiles) o bien mediante enlaces químicos. En el primer mecanismo (fisisorción), el gas se adsorbe en un medio adsorbente de elevada área superficial, como, por ejemplo, el carbón activado o zeolitas. En el mecanismo de quimisorción, el gas reacciona con una sustancia reactiva que recubre o impregna el material adsorbente. El aire contaminado entra en el sistema de filtración, pasa a través del adsorbente, es adsorbido y sale del filtro limpio. Los principales factores que influyen en la tasa de filtración son:

- Cuanto más cantidad de adsorbente tenga el filtro, más contaminantes retendrá y más rápido se adsorberán. Además, los altos niveles de carbón activado aumentan la vida útil del filtro.
- El uso de esta tecnología junto con otros filtros que retienen las partículas (polvo, pelusas, etc.) retrasa la saturación del filtro, haciéndolo más eficaz y duradero, por lo que requerirá menos reemplazos y emitirá aire limpio durante más tiempo.
- En el caso de la fisisorción, cuanto menor sea el tamaño de las partículas de adsorbente sólido (carbón activado, por ejemplo) más eficaz será.

Si la cantidad de adsorbente es suficiente, ambos procesos de adsorción eliminan eficazmente muchos contaminantes gaseosos. Por ejemplo, los filtros de carbón activado que se encuentran en algunos LA están impregnados de otros compuestos como dióxido de magnesio y óxido de cobre para eliminar aún más contaminantes peligrosos del aire, como CO, óxido de etileno y O_3 . El material adsorbente se consume al limpiar el aire, y es necesario reemplazarlo regularmente.

2.3.4. Oxidación fotocatalítica (PCO, *Photocatalytic Oxidation*)

La fotocatalisis es una reacción fotoquímica a temperatura ambiente que convierte la energía procedente de una fuente de radiación UVA (de luz solar, luz fluorescente o LED UVA) en energía química, (reacciones tanto de oxidación como de reducción), en la superficie de un catalizador o sustrato, consistente en un material semiconductor de banda ancha, generalmente dióxido de titanio (TiO_2) o zirconia (ZrO_2), que aceleran la velocidad de reacción (fotocatalizador). En la figura 6 se esquematiza este proceso fotocatalítico heterogéneo.

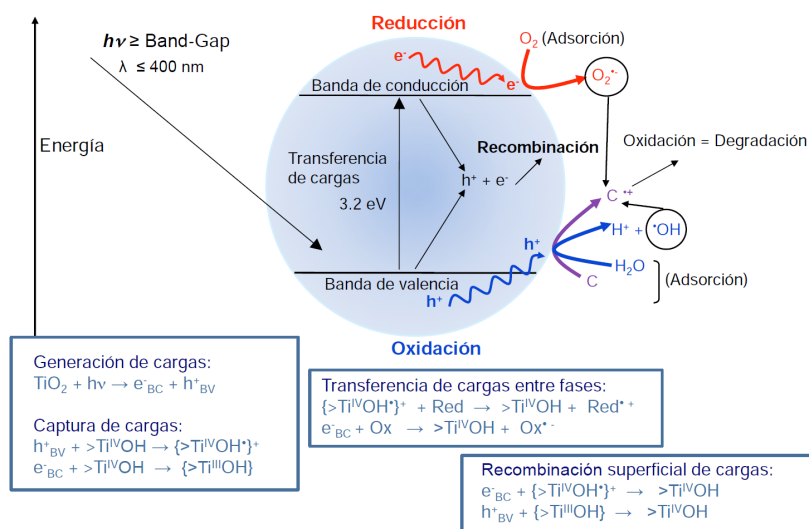


Figura 6. Esquema de un sistema basado en tecnología PCO [Faraldos Izquierdo 2016].

El proceso se basa en la excitación electrónica de átomos del semiconductor, mediante la irradiación con luz de una energía igual o superior a su *band-gap*, produciendo la transición de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción y formando pares electrón-hueco (e^-/h^+). Estos pares e^-/h^+ fotogenerados pueden migrar a la superficie del catalizador y reaccionar con especies adsorbidas o próximas a la superficie (contaminantes). Los huecos (h^+) formados en la banda de valencia del semiconductor pueden reaccionar con especies donantes de electrones, como son las moléculas de agua adsorbidas, generando radicales OH, muy reactivos, capaces de degradar los compuestos orgánicos. Por su parte, los electrones pueden reaccionar con especies aceptoras de electrones, como el O_2 , dando lugar a radicales e iones superóxidos (O_2^-) [Faraldos Izquierdo 2016]. Los radicales OH e iones O_2^- son altamente reactivos y tienen un tiempo de vida muy corto, por lo que no persisten lo suficiente como para viajar a través del aire lejos de la superficie del catalizador y los usuarios no estarán expuestos a O_2^- y OH (adaptado de [ATECYR DTIE 2.07]). Pueden eliminarse NO_x y COVs, que atraviesan el reactor de fotocatalisis e, incluso en muchos LA basados en esta tecnología, se dice que pueden tener efecto desinfectante al afectar las membranas celulares de algunos microorganismos presentes en el aire: virus, mohos y levaduras, bacterias, hongos y sus productos (micotoxinas, alérgenos, etc.). La reacción de OH con COVs genera subproductos nocivos como formaldehído, acetaldehído y O_3 . Si la oxidación

fuera completa, formaría CO_2 y H_2O (o nitratos, en el caso de la oxidación de NO_x), pero esto no es posible en equipos de uso en interiores, por lo cual se pueden generar muchos COV oxidados.

Con esta tecnología se puede degradar una amplia gama de contaminantes gaseosos, como aldehídos, compuestos aromáticos, alcanos, olefinas o hidrocarburos halogenados. Sin embargo, la eficacia de eliminación es relativamente baja y variable para muchos gases de interior. Por ejemplo, para el formaldehído o tolueno puede ser de solo 30% aproximadamente, aunque puede mejorarse si se combina con medios adsorbentes o filtrantes. Si hay siloxanos en el aire ambiente, el funcionamiento de un limpiador de aire PCO se ve afectado, ya que se produce una rápida desactivación del fotocatalizador mediante la conversión de los siloxanos en sílice amorfa en la superficie del catalizador. Hay et al. [2010] demostraron que la vida útil del fotocatalizador se duplica cuando un limpiador de aire está protegido por un filtro adsorbente. Por otro lado, el filtrar el aire antes de que tenga lugar la PCO, a pesar de aumentar la caída de presión, evita que las partículas se oxiden fotocatalíticamente provocando una desactivación reversible o irreversible del fotocatalizador. Por tanto, la desactivación del fotocatalizador es uno de los inconvenientes de los sistemas de PCO. Además, la degradación de los contaminantes primarios produce otros COV secundarios potencialmente más tóxicos. Así pues, son necesarias medidas de campo para validar su funcionamiento.

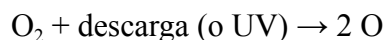
2.3.5. Plasma frío

Se define plasma como un estado fluido similar al estado gaseoso con una determinada proporción de sus moléculas cargadas eléctricamente (ionizadas). Por eso es buen conductor eléctrico y se puede caracterizar como un **gas ionizado**. Esta tecnología se conoce también como plasma no térmico o ionización bipolar por plasma frío o a baja temperatura. Los LA con plasma excitan el oxígeno y generan iones O_2^- e iones positivos (H^+) que se propulsan hacia el exterior del aparato. Una vez que el plasma se combina con el vapor de agua del aire ambiente, forma radicales OH. De este modo, la limpieza del aire se produce en el exterior del equipo, lo que presenta algunos inconvenientes.

Como el resto de las tecnologías basadas en campos eléctricos con alto voltaje, puede producir O_3 y otros subproductos, como partículas, formaldehído, CO, cloroformo, NO_x y una gran cantidad de otros COVs oxidados. Por otro lado, en la *nota informativa sobre dispositivos purificadores de aire y otros dispositivos para la desinfección de superficies* emitida por el Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social en 2020 [MSCBS 2020], se indica que actualmente no existe una decisión por parte de la Comisión Europea sobre la consideración del plasma frío como biocida. Aunque se han realizado ensayos, por ejemplo en la Universidad de Padua (Italia), que han permitido evaluar y validar la eficacia antiviral de esta tecnología contra el coronavirus SARS-CoV-2, la posible formación de subproductos no se ha investigado.

2.3.6. Generadores de ozono u ozonizadores

El ozono es un compuesto muy oxidante. Ha de producirse in situ debido a que su elevada reactividad impide que se pueda almacenar a temperatura ambiente. Los generadores de O_3 , también llamados *ozonizadores*, lo producen a partir de O_2 procedente del aire ambiente (u oxígeno puro en aparatos más dedicados a la investigación) sometido a una descarga eléctrica (llamada "efecto corona") en placas cerámicas o en un tubo de cuarzo o a radiación UV. Los átomos de O generados en la descarga o por fotólisis UV se asocian al O_2 para formar O_3 :



$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$, siendo M un tercer cuerpo (en este caso N_2 , gas más abundante en el aire)

La cantidad de O_3 (normalmente expresada en mg/h) que generan estos dispositivos es muy superior a los límites de exposición saludables. En España, el valor límite permitido de O_3 (a 8-h) es de 0,1 mg/h (equivalente a 0,05 ppm), mientras que el valor límite de O_3 a corto plazo, es decir, menos de 15 min (véase tabla IV.1) no debe superar los 0,4 mg/h (equivalente a 0,2 ppm). Por ese motivo, estos sistemas LA no deben funcionar en presencia de personas y una vez que dejan de funcionar ha de esperarse el tiempo necesario para que la concentración de O_3 ambiental disminuya a los niveles anteriormente citados (que puede ser una hora o más, si los niveles son altos y no hay ventilación). Los niveles tan elevados de O_3 a los que están expuestos los materiales presentes en el espacio interior (gomas, plásticos, telas, metales, etc.) durante el uso del ozonizador pueden causar también su degradación.

El O_3 se utiliza para desinfectar aguas de piscinas, jardines, limpieza, etc. de forma eficaz. Sin embargo, su inocuidad para desinfectar y/o limpiar el aire interior está cuestionada, ya que, además de sus efectos directos muy negativos sobre la salud humana, su reactividad con COVs presentes, como contaminantes primarios en el aire interior, puede dar lugar a otros contaminantes secundarios altamente oxidados, en muchos casos muy perjudiciales y cancerígenos, como formaldehído [Finlayson-Pitts 2000]. Por ejemplo, en presencia de limoneno, procedente de los ambientadores o de productos de limpieza perfumados, el O_3 puede producir formaldehído, ácido fórmico [Gallimore 2017] (ver figura 7) y H_2O_2 [Tsung-Hung 2002] que, por acción de la luz, forma radicales OH. Estos, que son mucho más reactivos, siguen con la cadena de reacciones en fase gaseosa, degradando los contaminantes primarios existentes en el aire interior con más rapidez y formando otros contaminantes gaseosos y aerosoles orgánicos secundarios (SOAs, *secondary organic aerosols*) [Hallquist 2009]. Estos SOA pueden formar partículas ultrafinas altamente perjudiciales para la salud. Además, la reactividad del O_3 con compuestos insaturados puede formar directamente radicales OH en interiores. La comunidad científica que estudia los procesos reactivos en la atmósfera tiene conocimiento de la formación de radicales OH en la ozonólisis de alquenos desde finales de los años 1990 (véase p. ej. [Finlayson-Pitts 2000]). Más recientemente, se ha publicado que los SOAs producidos en

estas reacciones de ozonólisis también generan radicales OH en presencia de luz [Badali 2015]. La concentración de OH en el aire interior se midió en un aula en Marsella (Francia) (ver [Gómez Álvarez 2013]) y es del mismo orden que su concentración en la atmósfera. Por tanto, la presencia de O₃ en el aire interior produce radicales OH que generan, a su vez, una química secundaria que produce más contaminantes. Este es, sin duda, uno de los grandes inconvenientes de esta tecnología y, por ello, el uso del O₃ como desinfectante de uso ambiental se encuentra actualmente en revisión en la Unión Europea.

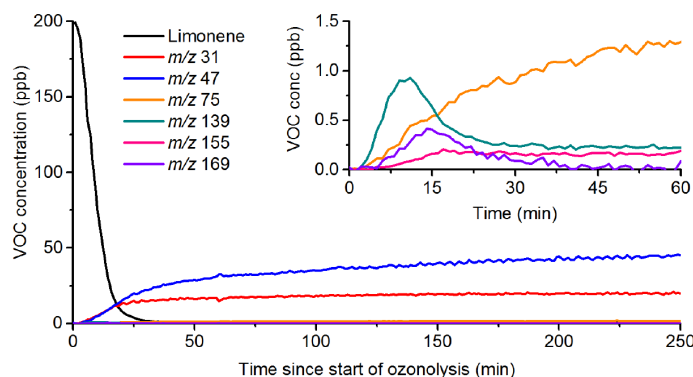


Figure 4: Concentrations of selected gas-phase VOCs including limonene, formaldehyde (m/z 31) and formic acid (m/z 47) detected using PTR-MS during limonene ozonolysis. The inset graph shows products formed in lower concentrations, including first-generation unsaturated species (m/z 139, limonaketone and m/z 169, limonaldehyde) which are removed by further ozonolysis.

Figura 7. Formación de formaldehído (curva roja) y ácido fórmico (curva azul) en la reacción de O₃ con limoneno [Gallimore 2017].

La eficacia virucida del O₃ para la inactivación de muchos virus, incluido el SARS-CoV-2, ha sido revisada recientemente en [Grignani 2021] con el fin de establecer las condiciones óptimas de concentración, tiempo de contacto (ver figura 8), humedad, etc. para su posible uso como desinfectante para ambientes interiores. Dependiendo del tipo de virus, la concentración de O₃ necesaria para obtener una inactivación del 90% varía de 0,6 a 25 ppm. Para el SARS-CoV-2, se sitúa entre 1 y 6 ppm a humedades relativas del ambiente entre 60% y 80%. Estas son concentraciones altísimas desde el punto de vista de la salud humana, entre 20 y 120 veces mayores que los límites legales de exposición permitidos en España.

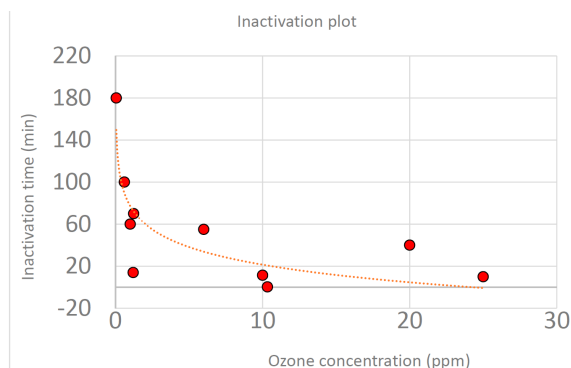


Figura 8. Relación entre concentración de ozono y tiempo de contacto para la inactivación viral [Grignani 2021].

En resumen, los ozonizadores solamente presentan acción biocida a concentraciones altísimas de O_3 , las cuales tienen un gran impacto directo y negativo sobre la salud humana. Puede ser útil para desinfectar superficies cuando no hay personas presentes y se puede ventilar adecuadamente después, pero esto no es relevante para el SARS-CoV-2 que se transmite mal por superficies [Nature Editors 2021]. Además, es importante la formación de subproductos químicos, algunos de los cuales (por ejemplo, formaldehído) tienen claros efectos perjudiciales para la salud.

3. Acciones de regulación de mercado y seguridad de uso por usuarios de equipos LA

La preocupación de los ciudadanos por el aire que respiran ha aumentado con la actual pandemia y se espera que esa tendencia continúe en esta década. Prueba de ello es el incremento del mercado internacional de equipos LA. La figura 9 muestra como ejemplo el mercado actual y el previsto en EEUU para equipos LA por tecnología en el periodo de 2016 a 2027 [Research & Markets 2020].

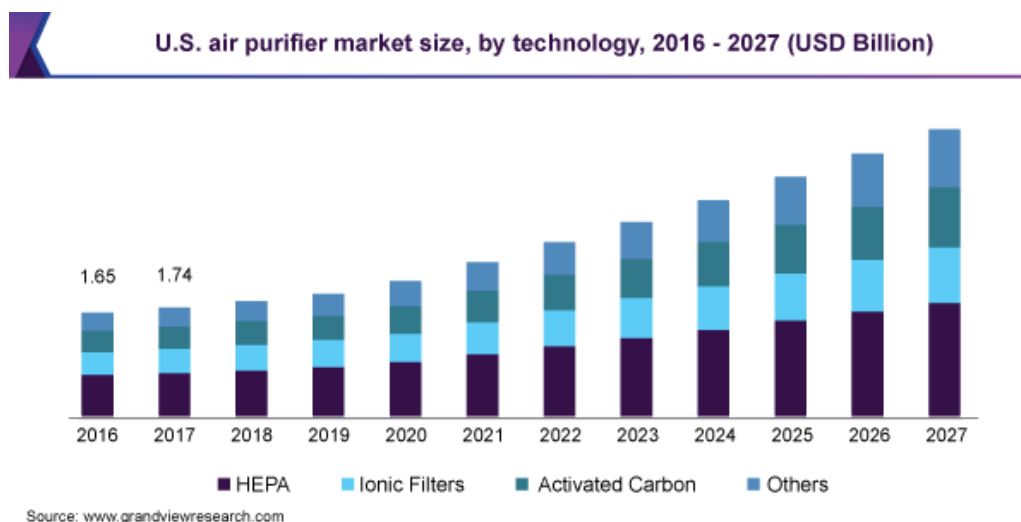


Figura 9. Mercado en EEUU de equipos de limpieza de aire por tecnología [Research & Markets 2020].

Para equipos filtrantes, debe estar certificado el tipo de filtro, el caudal de aspiración con filtro y a lo largo del periodo de uso del mismo (cuando el filtro comience a cargarse), siendo necesario señalar que es tan importante certificar el caudal de aire del equipo como certificar el filtro. Tal y como se indica en el **Anexo II**, la capacidad filtrante del equipo debe caracterizarse por su 'caudal de aire limpio' o CADR, que tiene en cuenta tanto el caudal de aire impulsado como la eficacia de filtrado (la cual depende, a su vez, de la eficacia del material filtrante y de posibles fugas internas en el circuito de filtración). A modo de ejemplo, para conseguir en un espacio público interior ocupado continuamente por 30 personas una tasa de renovación de aire limpio de 12,5 l/s y persona, como aconseja el MSCBS, se debe alcanzar un CADR de 1.350 m³/h. Si solo

se alcanzara el 50% de ese caudal, el filtro proporcionaría un nivel real de protección de solo la mitad del recomendado.

Más compleja de abordar es la regulación de los equipos de oxidación, ionización, ozonificación, que oxidan aerosoles y eliminan la viabilidad (potencial infeccioso) de los virus. Las razones de esta complejidad son diversas. En primer lugar, es difícil demostrar su eficacia dado que:

- Deben utilizarse virus viables y ello conlleva un riesgo biológico asociado y, generalmente, no se demuestra su eficacia en emplazamientos con condiciones parecidas al emplazamiento en donde se aplica.
- La viabilidad del virus se elimina en los filtros al ser retenido en un sustrato filtrante y expuesto a desecado por el continuo flujo de aspiración (sin necesidad de aplicar radiaciones u oxidantes). Tanto es así que, aunque se usan aerosoles retenidos en filtros para evaluar la presencia de virus mediante PCR, se desaconseja su uso para evaluar su viabilidad ya que la probabilidad de que las trazas detectadas sean inviables es muy alta [Pan et al. 2019].
- A veces se muestran resultados de PCR aplicados a estudios de eficacia que no son concluyentes y no prueban la viabilidad del virus ni la ausencia de la misma.

En segundo lugar, y de una complejidad aún mayor que lo anterior, está el hecho de que estas tecnologías pueden causar efectos colaterales indeseados como:

- Algunos de los procesos que tienen lugar durante el funcionamiento de los sistemas germicidas pueden generar radiaciones y/o oxidantes que puedan llegar a afectar la salud humana, especialmente en entornos cerrados.
- Algunos de los compuestos resultantes de la oxidación de gases y aerosoles pueden generar subproductos con efectos en la salud humana.

En estos últimos y complejos aspectos, la certificación de la ausencia de efectos colaterales indeseados es mucho más compleja, por su variabilidad, amplio rango y condiciones de uso. Por tanto, es necesario establecer una serie de acciones y medidas para regular la información del equipo LA para el usuario y advertir de los potenciales riesgos para la salud que presenta el uso de algunas tecnologías. En concreto, las actuaciones deben orientarse a:

- Obligar a que los equipos LA certifiquen el CADR que proporciona el equipo. Además, para equipos de filtración, deben acreditar la certificación del filtro utilizado. De no adjuntar dichas certificaciones, obligar a que se exponga literalmente que no presenta certificados.
- Asegurar las prestaciones de equipos para garantizar que ofrecen un grado de seguridad frente a SARS-CoV-2 adecuado a la ocupación, volumen del local y otras características del espacio. Ello podría resolverse ofreciendo en la web de la marca un sistema de cálculo basado en las recomendaciones oficiales para prevención de SARS-CoV-2, para que una vez

conocido el volumen y el número de ocupantes del espacio a limpiar, se hiciera un cálculo de los m^3/h necesarios para hacerlo adecuadamente.

- Asegurar un correcto diseño y selección de instrumentos y parámetros, dimensionado, uso y mantenimiento, incluyendo alarmas para pérdida de caudales de aire necesarios y alertas para cambio de filtros.
- Evitar riesgos para las personas, especialmente los derivados de determinados subproductos que resultan del tratamiento de aire en equipos LA con algunas tecnologías.

En este contexto, se presenta en el **Anexo II** la métrica que permite caracterizar la eficacia de los equipos LA. En el **Anexo III** se revisan las normas internacionales para ensayar las prestaciones de los mismos y certificar sus condiciones de operación. En el **Anexo IV** se resumen los potenciales riesgos derivados del uso de estos equipos. Todo ello se presenta con la intención de avanzar hacia una **regulación del mercado de equipos LA** que proteja a los consumidores y usuarios y les mantenga informados para hacer un uso responsable de estos equipos.

3.1. Actuaciones relativas a certificación de equipos

El resultado del proceso de certificación debería generar una información clara y concisa para el usuario del equipo LA. En concreto, la información que se aporte al usuario, por ejemplo en forma de etiqueta en el equipo LA con un formato normalizado, debería incluir lo siguiente:

- Tasa de suministro de aire limpio, CADR, del equipo LA:
 - Para equipos de filtrado, debe especificarse el CADR para tres categorías de partículas:
 - Partículas pequeñas (humo de $0,09$ a $1 \mu\text{m}$).
 - Partículas medianas (polvo de $0,5$ a $3 \mu\text{m}$).
 - Partículas grandes (polen de $0,5$ a $11 \mu\text{m}$).
 - Para tecnologías distintas del filtrado, para determinar el CADR el concepto de ‘aire limpio’ debe interpretarse como ‘aire libre de virus activo’.
- Eficiencia energética CAE del equipo LA de acuerdo al protocolo de ensayo y clasificación de Eurovent RS/4/C/002-2017.
- Nivel de presión sonora (ruido) que genera el equipo LA en su entorno cuando trabaja a máximo caudal de aire.
- Información sobre la emisión de posibles subproductos generados durante la operación del equipo LA tales como O_3 , formaldehído, óxido nitroso, COVs oxidados, partículas ultrafinas, entre otros y los riesgos para la salud de las personas.

3.2. Actuaciones relativas a la regulación del mercado y uso de equipos LA

A continuación se proponen una serie de actuaciones a llevar a cabo desde las Administraciones públicas para regular convenientemente el mercado y el uso de equipos LA:

- Desarrollar normativa específica para el ensayo de equipos LA.
- Desarrollar y armonizar normativa relativa a la certificación de equipos LA (para empresas fabricantes). Ver apartado 3.1 y **Anexo II** en lo relativo a la etiqueta del equipo LA.
- Desarrollar y armonizar normativa para informar al usuario mediante la etiqueta del equipo LA (para usuarios y técnicos). Ver apartado 3.1 y **Anexo II**.
- Crear una base de datos de acceso público de equipos LA “certificados” en la que usuarios, técnicos e ingenierías puedan consultar la información técnica de dichos equipos (ver ejemplos similares en EEUU, CARB [CARB 2021] y AHAM [AHAMDIR 2021]):
 - Eficacia frente a distintos contaminantes: partículas/aerosoles, gases, microorganismos y alérgenos.
 - Subproductos generados: indicar el valor medido frente al umbral de seguridad.
 - Eficiencia energética: categoría energética ($\text{m}^3/\text{h}/\text{W}$).
 - Nivel de ruido (presión sonora en dBA).
 - Superficie de local recomendado (m^2).
 - Precio de mercado (euros).
- Llevar a cabo campañas informativas sobre el buen uso de equipos LA y las ventajas de usar productos certificados y elaborar guías de recomendaciones de uso de equipos LA, guías de dimensionado, guías de mantenimiento, etc.
- Promover estudios de investigación relacionados con equipos LA (ver apartado 5).

3.3. Actuaciones relativas a la información de la calidad de aire interior para el usuario

Los usuarios tienen el derecho a conocer la calidad del aire que respiran en el interior de los edificios. Por ello, se propone establecer acciones encaminadas a regular la información que recibe el usuario de la calidad del aire cuando se encuentra en el interior de espacios públicos. Por ejemplo, deberían establecerse recomendaciones para que los locales de pública concurrencia dispongan de pantallas informativas (ver figura 10) de la concentración de CO_2 en aire, como indicador del nivel de ventilación existente. Esta medida puede contribuir a regular de forma más precisa la actividad de muchos locales en lo que respecta a porcentajes de ocupación y aforo.



Figura 10. Ejemplos de pantallas informativas que incorporan la concentración de CO_2 .

4. Sensores

El análisis rápido y preciso de la presencia del virus SARS-CoV-2 en aerosoles o en el aire sería la forma ideal de controlar la transmisión en todo tipo de ambientes, especialmente en los de interior. Lo deseable sería que ese análisis se pudiera hacer en el lugar y momento en que se necesitara, en tiempo real y con una alta precisión y selectividad. A continuación, discutiremos las diversas tecnologías existentes para la detección directa o indirecta del virus y su grado de desarrollo actual. A modo de anticipo, hay que decir que no existe ninguna tecnología para la detección directa del virus que haya llegado a un amplio despliegue comercial, si bien hay anuncios recientes de compañías en ese sentido. La detección de aerosoles es perfectamente factible con la tecnología disponible a nivel comercial, si bien esta tecnología no tiene utilidad práctica para el problema que nos ocupa, por su incapacidad para separar los distintos tipos de aerosoles, y la baja abundancia relativa de los aerosoles de origen respiratorio. Finalmente, la única aproximación a la detección indirecta del virus totalmente viable a nivel comercial a bajo coste en este momento es el uso de sensores de CO₂, que permiten valorar si los espacios interiores están adecuadamente ventilados y, por tanto, estimar indirectamente el riesgo potencial de infección que supondría la presencia de aerosoles conteniendo el virus.

4.1 Sensores de detección de virus en el aire

La detección directa del SARS-CoV-2 en el ambiente es una de las aproximaciones más demandadas en la pandemia de la COVID-19. Sin embargo, esta identificación directa en el aire (específicamente en muestras de aerosol) no se ha conseguido hasta la fecha, a pesar de los numerosísimos intentos y desarrollos tecnológicos que se encuentran en marcha [Huffman 2019]. Esto se debe principalmente a la gran complejidad técnica que implica este proceso de detección, que incluye tanto lo que se refiere a la adecuada recolección de las muestras aéreas, como la necesidad de detectar concentraciones extremadamente bajas que suelen encontrarse en las muestras de aerosol. A lo anterior se suman los problemas de reactividad cruzada debido a la amplia variedad de otras especies presentes, la gran cantidad de impurezas interferentes y la influencia de factores externos en la medida, como la temperatura, intensidad de la luz, humedad ambiental o velocidad del aire, entre otros. Así pues, a pesar de los muchos desarrollos en marcha, todavía no se ha conseguido ningún método/sensor que permita la detección en tiempo real y totalmente selectiva de patógenos vegetales, animales o humanos (tanto infecciosos como tóxicos) y por ello sigue representando un gran desafío tecnológico.

Existen algunas tecnologías comerciales para la evaluación de bioaerosoles basadas en técnicas como espectrometría de masas, espectroscopía de fluorescencia, espectroscopía Raman u otras técnicas ópticas, incluyendo incluso versiones portátiles. Sin embargo, aunque estos equipos pueden identificar la presencia de bioaerosoles, tienen gran dificultad para distinguir entre

especies, así como para precisar el estado de viabilidad o para dar un valor de concentración cuantitativa. Es decir, no son capaces de discriminar bien entre el tipo de patógeno (bacteria, virus, hongos) y, sobre todo, dentro de cada tipo cuál es en concreto. Tampoco pueden distinguir entre agentes patógenos viables y no viables. Además, pueden sufrir de muchas interferencias por otras moléculas químicas (como aerosoles orgánicos de la contaminación), especialmente cuando pueden existir altas concentraciones de interferentes, como en ambientes urbanos o en edificaciones (aires interiores). Además, son técnicas muy costosas y algunas de ellas no son rápidas y precisan de un análisis de datos posterior que puede incluso llevar varias horas.

Otras técnicas que podrían llegar a ofrecer una medida de los bioaerosoles de forma cuantitativa y selectiva, como son las basadas en microfluídica o en dispositivos biosensores [Ma 2021], han sido ampliamente estudiadas y publicadas en la literatura científica. En este caso, es necesario la combinación de sistemas colectores de aire con una detección basada en técnicas bioquímicas, inmunológicas (como ELISA) o moleculares (como RT-PCR), lo que confiere un alto grado de selectividad y precisión en la evaluación [Pan 2019]. La recolección de la muestra sigue siendo uno de los principales cuellos de botella, ya que las muestras suelen contener muchos interferentes y el contenido de microorganismos en aerosoles ambientales suele ser muy bajo, como se ha comentado anteriormente, por lo que hay que incorporar además sistemas de preprocesado de la muestra antes de su medida.

Generalmente, para la medida e identificación de los virus, las muestras recolectadas y tratadas se transportan a un laboratorio para su evaluación, por ejemplo por PCR o por ELISA. Pero para conseguir una medida in situ y descentralizada, los sensores o técnicas a emplear para la detección (como biosensores o PCR) deben ser miniaturizados junto con su instrumentación asociada, lo que añade un grado de complejidad más al desarrollo final. Por todo ello, aunque el progreso ha sido considerable en los últimos años y especialmente durante la pandemia, con una amplia gama de sensores y biosensores que se están estableciendo o bajo desarrollo, y con numerosos y buenos resultados publicados, estas tecnologías sólo están empezando a llegar a una fase comercial, con incertidumbre sobre su funcionamiento en el mundo real. Los costes por unidad mencionados por los fabricantes hasta la fecha son de decenas de miles de euros por unidad, lo cual haría prohibitivo su despliegue a gran escala.

La compañía americana Smith Detection, una de las líderes mundiales en sistemas de detección ambiental, ha anunciado recientemente que su tecnología biosensora [BioFlash® Biological Identifier 2021] es capaz de detectar el SARS-CoV-2 en muestras de aire con suficiente sensibilidad y selectividad y está empezando a comercializarla, aunque de momento la información sobre su uso en situaciones reales es escasa. Esta tecnología tiene el inconveniente de su alto coste, no solo por el instrumento en sí, sino por su mantenimiento y los recambios de biochips fungibles. La compañía canadiense Kontrol BioCloud [Kontrol BioCloud 2021]

también ha anunciado recientemente un producto que captura aerosoles en tiempo real y los cuantifica a través de un proceso químico-óptico (los detalles no son públicos).

4.2 Sensores de aerosoles

En las enfermedades de transmisión aérea los virus viajan en aerosoles respiratorios, que están compuestos de sustancias como saliva, mucina, cloruro sódico, etc. Existen tecnologías de bajo coste (200 euros) para detectar la concentración de aerosoles en tiempo real usando métodos ópticos (p.ej. los sensores de [Purple Air 2021] y otros basados en los sensores de [Plantower 2021]). Estos sensores son muy útiles para evaluar la calidad del aire exterior e interior.

Una pregunta natural es si se podrían usar estos sensores para detectar la presencia de aerosoles respiratorios en el aire y así proceder, por ejemplo, a ajustar la ventilación cuando su concentración fuese alta. En la práctica, este método no es viable, dado que los aerosoles respiratorios son generalmente una parte muy pequeña de los aerosoles totales presentes en el aire interior. Las concentraciones de aerosoles del exterior que se infiltran y las de fuentes interiores como la resuspensión al andar o el cocinar suelen ser de órdenes de magnitud mayores. Al medirse sólo la concentración total y al cambiar la infiltración de aerosoles procedentes del exterior (que varían mucho en el tiempo) al ventilar, no es posible separar la concentración de aerosoles respiratorios.

Este tipo de equipos tienen una aplicación en este contexto: son útiles para evaluar la eficacia de equipos (como filtros HEPA) que quitan los aerosoles del aire.

4.3 Sensores de dióxido de carbono, CO₂

Los sensores de CO₂ son a día de hoy la única alternativa fiable y económica para evaluar de forma aproximada el riesgo de transmisión del SARS-CoV-2 por aerosoles y permitir su reducción, mientras no exista la posibilidad de medir directamente la presencia de patógenos en el aire. Este método se basa en el hecho de que las personas infecciosas exhalan tanto CO₂ como aerosoles con virus, y estos se comportan de manera similar en el aire en periodos de tiempo cortos (~1-2 h) en los que el virus permanece infectivo en el aire. De esta manera, la presencia de concentraciones elevadas de CO₂ en aire interior indica la acumulación de aire exhalado por mala ventilación y, en caso de estar presente una persona infecciosa, indicaría la acumulación del virus en el aire [Rudnick & Milton 2003]. De forma *relativa*, en un lugar y actividad determinados, el riesgo de infección por aire compartido (manteniendo la distancia para evitar la infección por proximidad) es proporcional a la cantidad de CO₂ por encima de unos 415 ppm (o por encima del nivel en el exterior, si es más alto). De forma *absoluta*, el riesgo puede variar entre diferentes situaciones, aunque el CO₂ sea el mismo, debido a diferencias en la vocalización,

uso de mascarillas, y volumen respirado [Peng & Jimenez 2021]. El riesgo diferencial se puede cuantificar con modelos de infección (ver e.g. [Jimenez & Pen 2021] o [Bazant & Bush 2021]).

El CO₂ ambiental se mide por diferentes metodologías. Las más comunes usan sensores de tipo:

- *Electroquímicos (EC, Electrochemical)*: El CO₂ interviene en una reacción redox sobre un electrodo, generando una corriente eléctrica proporcional a la concentración en el ambiente.
- *Semiconductores de óxidos de metales (MOS, metal oxide semiconductor)*: No miden el CO₂ directamente, sino que lo estiman. Los COVs se adsorben sobre la superficie del semiconductor y se mide el cambio en la resistencia eléctrica de éste producido por la adsorción, que es proporcional a la cantidad de COVs adsorbidos. Se usa una correlación entre los COVs y el CO₂ en el aire exhalado para estimar el CO₂.
- *Infrarrojo (IR) no dispersivo (NDIR)*: Este es un método espectroscópico que se basa en cuantificar el CO₂ por la cantidad de luz IR que absorbe. Se utiliza en muchos dispositivos comerciales de bajo coste (por debajo de 200 €).

La figura 11 muestra esquemáticamente las partes de las que constan estos medidores de CO₂ NDIR y que se detallan a continuación:

1. Una cámara por donde fluye el aire. Algunos medidores de CO₂ NDIR poseen dos cámaras, una de ellas de referencia que ayuda a corregir las desviaciones en la medida.
2. Una fuente de irradiación IR, normalmente un LED.
3. Un filtro óptico que filtra la radiación de una longitud de onda específica.
4. El sensor de IR, que detecta la radiación IR filtrada y no absorbida por el CO₂.

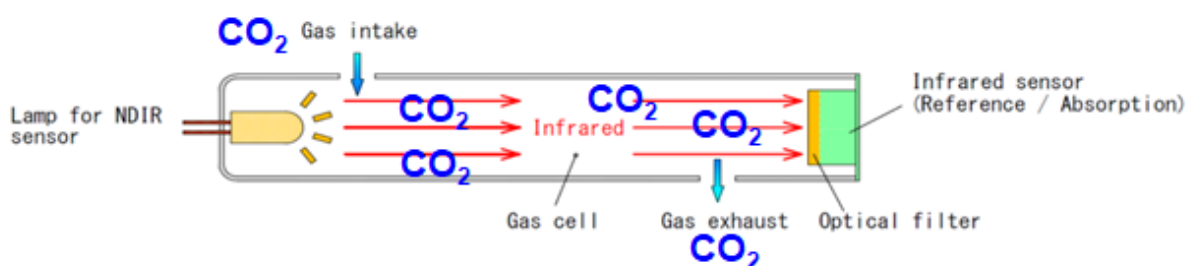


Figura 11. Esquema de un sensor NDIR de haz simple.

Las principales ventajas e inconvenientes de los distintos tipos de sensores de CO₂ se resumen en la Tabla 1. Los sensores MOS poseen la gran desventaja de que son *métodos indirectos* para determinar la proporción de CO₂ en el aire interior y pueden estar afectados por la presencia de otras especies interferentes que sufren reacciones redox sobre el electrodo del sensor o se adsorben en la superficie del semiconductor, respectivamente. Al contrario, los medidores de CO₂ con sensores NDIR son más fiables, porque transforman directamente la cantidad de radiación IR de una longitud de onda específica (normalmente 4,28 micras) absorbida por el CO₂ en concentración y, posteriormente, en relación de mezcla (es decir, el número de moléculas de

CO₂ por millón de moléculas de aire - ppm), considerando las moléculas que hay en el aire a la presión y temperatura locales. El único inconveniente de los sensores NDIR es que la humedad relativa, es decir, el vapor de agua ambiental, puede interferir en la medida, ya que también absorbe radiación IR en la misma zona de frecuencias. Por esa razón, estos sistemas suelen incorporar un sensor de humedad relativa para corregir la medida de CO₂. La temperatura también puede interferir en la medida, por lo que, para corregir su efecto, los medidores de CO₂ NDIR también llevan generalmente sensores de temperatura. Por ello, **recomendamos los sensores de CO₂ NDIR** para medir la cantidad de CO₂ en un espacio interior y relacionarlo con el % de aire respirado por segunda vez en ese espacio, aumentando la probabilidad de contagio si hay una persona infectada presente.

Tabla 1. Comparativa de los sensores de CO₂ más comunes.

Tipo de sensor	Ventaja(s)	Inconveniente(s)
EC	Menos susceptible a cambios de temperatura y humedad relativa. Consumo de energía muy bajo.	Baja durabilidad. Tiempo de vida corto. Interferencia de otros gases.
MOS	Fáciles de usar.	No miden CO ₂ directamente. Posible interferencia de H ₂ O, temperatura y otras sustancias (especialmente COVs) que pueden adsorberse en el semiconductor. Baja sensibilidad y selectividad.
NDIR	Larga durabilidad. Equipos sencillos de usar. Precisión alta.	Posible interferencia de H ₂ O y temperatura (si no llevan sensores de humedad relativa y temperatura).

La normativa en relación a la cantidad de CO₂ en ambientes de interior es algo diversa. La OMS, y países como Taiwán y Corea del Sur, recomiendan un límite de 1000 ppm (antes de la pandemia) para garantizar la calidad del aire interior, mientras que el grupo científico que asesora al Gobierno del Reino Unido (SAGE) recomienda un límite de 800 ppm. En España, la normativa vigente (pre-pandemia) recogida en el *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios* (RITE), aprobado en el Real Decreto 1027/2007 [RITE 2007], establece el límite de CO₂ en un ambiente interior en función de la calidad del aire interior (IDA) (tabla 2). Por ejemplo, para considerar al aire interior de óptima calidad es asumible un **incremento de 350 ppm** respecto al nivel de CO₂ exterior. Es decir, si en el exterior la concentración de CO₂ es de 400 ppm, el nivel de CO₂ en estos espacios interiores no debe superar los 750 ppm. Sin embargo, para limitar el contagio por COVID-19, el informe científico del MICINN de España recomienda mantener el CO₂ por debajo de 700 ppm [MICINN 2020], dado que el riesgo relativo de infección por SARS-CoV-2 disminuye proporcionalmente a la concentración de CO₂ (por encima del nivel al aire libre). En caso de haber un nivel alto de filtración de aire en el espacio, el nivel de CO₂ tolerable durante periodos de pandemia podría ser de hasta 1000 ppm.

Tabla 2. Límites de CO₂, relativos al exterior, establecidos en el [RITE 2007].

Calidad del aire RITE	Espacios interiores	Incremento de CO ₂ respecto al exterior (ppm)
IDA1 - Óptima	Hospitales, clínicas, laboratorios, guarderías	350
IDA2 - Buena	Oficinas, aulas, residencia de ancianos, etc.	500
IDA3 - Media	Restaurantes, gimnasios, bares, cines, etc.	800
IDA4 - Baja	No se debe aplicar	1200

En cuanto a la ubicación de estos sensores, la norma UNE 16000-26 indica que, “para estancias de hasta 50 m² es suficiente tener un punto de muestreo por estancia que debería estar a 1,5 m de altura y a una distancia de al menos 1 a 2 m de las paredes”. No obstante, es necesario llevar a cabo estudios sobre el particular para locales grandes y/o de geometría intrincada.

5. Conclusiones y recomendaciones

En lo que se refiere a **tecnologías y equipos LA**, se establecen las siguientes conclusiones:

- **Contexto.** Las recomendaciones de este informe referidas a los equipos LA pueden permitir reducir el riesgo de transmisión del SARS-CoV-2 por aerosoles en espacios interiores en los que no sea posible una ventilación adecuada (la cual es preferible si se puede alcanzar). Hay que tener en cuenta, sin embargo, que estas medidas de prevención son efectivas para reducir la infectividad de la atmósfera general del recinto, pero el riesgo es mayor a distancias cortas o si no se usan mascarillas, además del debido a otras posibles vías como son las gotas de Flugge o el contacto indirecto a través de superficies y objetos. Por tanto, es importante remarcar que estas recomendaciones no suplen en ningún caso medidas como el distanciamiento social, el uso de mascarillas y lavado de manos, entre otros. Este documento se refiere específicamente al caso de equipos autónomos y su utilización para reducir riesgo de contagio de SARS-CoV-2. Por ello, algunas recomendaciones son más exigentes que las habituales para otros usos como es la eliminación de alérgenos u otros contaminantes.
- **Prioridades.** Centrándonos en la reducción del riesgo de transmisión por aerosoles mediante medidas de ingeniería en el entorno (se excluyen las de protección personal), las prioridades son, por este orden: i) **ventilación** con aportación de aire exterior por medios naturales o mecánicos (ventilación natural o forzada centralizada o con equipos autónomos); ii) **filtración** de aire mediante filtros de aire instalados en equipos de climatización existentes; iii) **filtración** de aire mediante filtros de aire HEPA instalados en equipos autónomos LA. Las medidas pueden ser complementarias, es decir, en el caso de ventilación insuficiente

(renovación de aire interior con aire exterior), se pueden emplear filtros en los equipos de climatización existentes que recirculan el aire y/o emplear equipos autónomos LA.

- **Tecnología recomendada.** Dentro de las tecnologías que se pueden encontrar en equipos LA, la tecnología recomendada es la filtración mediante el empleo de filtros de aire de alta eficacia o filtros HEPA certificados según norma UNE EN 1822-1:2020.
- **Uso recomendado.** Su uso puede estar indicado para situaciones en las que la ventilación (renovación de aire interior con aire exterior) no es suficiente o no es posible. La cantidad de aire libre de virus se cuantifica de forma aditiva, de modo que se ha de considerar el caudal de ventilación exterior (en m^3/h) + el CADR (en m^3/h) proporcionado mediante filtración.
- **Caudal de aire libre de virus necesario.** Para reducir el riesgo de transmisión es necesario proporcionar un caudal de aire libre de virus de forma continua, bien mediante aporte de aire exterior o mediante limpieza del aire interior. En todos los casos, el caudal requerido viene determinado por las dimensiones del espacio, la ocupación, la actividad realizada e incluso la incidencia acumulada en la región, sabiendo que el riesgo cero no se va a alcanzar. Se utilizan varios criterios para determinar el caudal de aire requerido: renovaciones de aire por hora, litros por persona y segundo o cantidad de aire re-respirado. Una vez determinado el caudal de aire limpio objetivo, se pueden hacer los cálculos adecuados para alcanzarlo. En el caso de que sea proporcionado mediante limpiadores de aire, el parámetro a considerar es la tasa de suministro de aire limpio o CADR. Por ejemplo, si se establece el caudal objetivo en 12,5 litros por segundo y persona, en un espacio de 120 m^2 con 30 personas se requiere $30 \cdot 12,5 \cdot 3600 / 1000 = 1350 \text{ m}^3/\text{h}$. En ausencia de ventilación, si el equipo de limpieza de aire tiene un CADR de $650 \text{ m}^3/\text{h}$, serán necesarios dos equipos para esa situación.
- **Operación del equipo.** El CADR especificado para el equipo es el que se obtiene a máxima potencia. Por eso, el equipo debe operar en modo manual a máxima velocidad, pues de lo contrario no aportaría la protección necesaria, dado que en modo automático tiende a conmutar a velocidades bajas. Únicamente se recomienda operar a velocidades bajas si se conoce el CADR correspondiente a cada posición y este resulta suficiente para las dimensiones y ocupación en ese momento. Es recomendable que los equipos incorporen un detector de la colmatación del filtro o de mal funcionamiento del equipo. Esto se puede conseguir midiendo la pérdida de carga a través del filtro. No se recomienda el uso de equipos LA cuyo control de caudal esté basado en medidas de concentración de partículas con medidores de bajo coste.
- **Otras tecnologías.** El resto de tecnologías empleadas en equipos LA, como ultravioleta, plasma frío, ionización y otras, pueden resultar efectivas para inactivar el virus SARS-CoV-2 en el aire, aunque sólo se ha demostrado para algunas de ellas. Sin embargo, estas tecnologías pueden emitir una serie de subproductos, bien productos indeseados, como O_3 u

otros oxidantes, o bien especies químicas derivadas de la oxidación o transformación de una enorme variedad de compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos por reacción con los oxidantes, o incluso partículas ultrafinas resultantes de dichas reacciones. Algunos de estos subproductos pueden resultar potencialmente peligrosos para la salud humana, incluso en concentraciones en el aire que podrían parecer muy bajas.

- **Filtración-inactivación de virus.** Los estudios y revisiones científicas sobre los métodos para muestrear virus en aire ambiente coinciden en que los filtros pueden retener la práctica totalidad de los aerosoles con virus. El proceso de captación puede suponer un daño mecánico para el virus, además de que el paso de elevados flujos de aire deshidrata los aerosoles ya retenidos en el filtro que potencialmente contienen virus, de modo que no es posible cultivar los virus a partir de ellos. Por tanto, el filtrado del aire en filtros HEPA inactiva el virus retenido con alta probabilidad y no son necesarias tecnologías adicionales para ello. Aún así, se aconseja precaución y uso de mascarilla en la manipulación de los filtros usados al sustituirlos, dado que pueden contener bacterias u otros contaminantes.
- **Certificación de equipos LA.** Es necesario establecer un procedimiento de ensayo de equipos LA que certifique por cada una de las tecnologías empleadas tres aspectos:
 - Que el equipo LA resulta efectivo en la retención de aerosoles y/o la inactivación del virus SARS-CoV-2 (y otros patógenos) que puedan estar presentes en los aerosoles o transmitirse por vía aérea.
 - Que la certificación no se limite al tipo de filtro o germicida, sino que se refiera a la aplicación del equipo completo, indicando el CADR que proporciona el equipo.
 - Que el equipo LA no emita o genere indirectamente durante su uso subproductos que puedan perjudicar la salud de las personas tales como O₃, formaldehído, ácido nítrico o nitroso, partículas nano y ultrafinas, especies reactivas de oxígeno, compuestos orgánicos volátiles oxidados y otras, o bien que la concentración de los subproductos emitidos no supere los umbrales de seguridad establecidos para garantizar la salud de las personas. Esta certificación tiene dos limitaciones: a) la instrumentación necesaria para determinar la gran variedad de subproductos generados es específica de investigación y no está disponible en la mayoría de los laboratorios y b) la generación de subproductos varía en función del entorno donde se aplique la técnica en cuestión; así, en un entorno con alto contenido en COVs, la generación de O₃ o la oxidación de los mismos puede dar lugar a la generación de formaldehído y partículas ultrafinas, además de las afecciones directas del propio O₃ sobre la salud, mientras que en entornos libres de COVs, altas concentraciones de O₃ pueden afectar a la salud directamente pero no generar indirectamente estos subproductos.

- **Certificación de filtros**. Los filtros incorporados en los equipos LA han de ir acompañados de su correspondiente certificación, sea cual sea esta. Los filtros HEPA están regulados por la norma UNE EN 1822:1-2020. Como primera opción se preferirá HEPA H13 o superior.
- **Acciones orientadas a informar de los equipos LA a técnicos y usuarios**. Se proponen las siguientes acciones:
 - **Guía de recomendaciones de dimensionado, uso y mantenimiento de equipos LA**. Dirigido a técnicos y usuarios en general.
 - **Etiqueta informativa requerida en equipos LA para técnicos y usuarios**. El resultado del procedimiento de certificación debe recogerse en una etiqueta informativa para técnicos y usuarios de equipos LA, que debería contener información sobre: i) la eficacia frente al virus por retención y/o inactivación del mismo, ii) caudal de suministro de aire limpio (CADR); iii) eficiencia energética del equipo, iv) nivel de presión sonora y v) la emisión de posibles subproductos generados durante la operación del equipo.
 - **Campañas de información** sobre técnicas de eliminación del virus, pros y contras, dirigidas a los consumidores y usuarios de los equipos LA.
- **Necesidad de estudios** para dar respuesta a preguntas todavía sin responder.
 - Ubicación idónea de varios limpiadores en un local para obtener la mejor eficacia según la distribución del aire en el espacio.
 - Volumen máximo del local que puede alcanzar un equipo LA. Más allá del CADR necesario para alcanzar las renovaciones de aire objetivo, existen limitaciones de dinámica de fluidos que imposibilitan que un único punto de salida de aire limpio alcance volúmenes muy grandes y el aire se mezcle bien. Hay que determinar cuál es el radio máximo de acción de un determinado caudal de aire limpio. En locales con grandes volúmenes de aire, ¿son realmente efectivos los equipos LA autónomos? ¿cuál es la distribución óptima de equipos LA en locales grandes? ¿Hasta qué punto son recomendables los equipos LA en conducto?
 - Propuesta de un procedimiento de auditoría que determine la eficacia del equipo LA en función de la ubicación del equipo, las características del local y la ocupación.
 - Modelización del riesgo de transmisión en diferentes situaciones en función de distintos parámetros, y en concreto en función de la renovación de aire o filtración de aire, incluyendo casos en los que se combine ventilación de aire exterior y uso de LA. La regulación actual de ventilación obedece a situaciones de no pandemia, así que se requieren estudios específicos para determinar los nuevos valores guía.

En cuanto al **uso de sensores** para detectar la presencia del virus SARS-CoV-2 o de aerosoles respiratorios en el aire y para medir la cantidad de CO₂, las conclusiones son:

- **Sensores para detectar el virus SARS-CoV-2 en el aire**. No existen sensores comerciales demostrados que puedan emplearse para detectar la presencia del virus en el aire de forma

directa y efectiva. Recientemente una empresa americana ha lanzado el primer biosensor específico al mercado, con el inconveniente de su alto coste e incertidumbre sobre su fiabilidad en este momento. Actualmente, lo más habitual es llevar a cabo un muestro del aire y trasladar las muestras a laboratorios centralizados para su posterior análisis por RT-PCR o técnicas inmunoquímicas como test ELISA.

- **Sensores de aerosoles respiratorios.** Aunque existen tecnologías de bajo coste para medir la concentración de aerosoles en tiempo real, no son aplicables para evaluar el riesgo de infección por SARS-CoV-2, dada la imposibilidad actual de estimar la parte que representan los aerosoles respiratorios, que es muy pequeña respecto al total. Estos equipos que miden aerosoles ambientales son útiles para evaluar la eficacia de equipos de filtración.
- **Sensores de CO₂.** El uso de sensores de CO₂ permite estimar la cantidad de aire exhalado por personas en un espacio interior, que es un indicador del riesgo asociado a la exposición a aerosoles y a la eventual presencia de virus en el aire. Al ser la única alternativa viable, portátil, y de bajo costo existente en el mercado, debería recomendarse su **uso generalizado en espacios interiores** de pública concurrencia y la instalación de **pantallas informativas** de los niveles de CO₂ en todos los interiores públicos.
- **Necesidad de estudios** para dar respuesta a preguntas todavía sin responder:
 - ¿Dónde colocar las sondas de CO₂ en un local para poder estimar bien el riesgo?
 - En locales de grandes volúmenes (centros comerciales, cines, teatros), ¿cuántos sensores de CO₂ hay que colocar para tener una buena estimación del riesgo?

Referencias

Afshari, A.; Ekberg, L.; Forejt, L.; Mo, J.; Rahimi, S.; Siegel, J.; Chen, W.; Wargocki, P.; Zurami, S.; Zhang, J. (2020). Electrostatic Precipitators as an Indoor Air Cleaner—A Literature Review. *Sustainability*, 12 (21), 8774. <https://doi.org/10.3390/su12218774>

AHAM. Assoc. of Home Appliance Manufacturers. Air Cleaner Certification Program Procedural Guide. 80 (2015). https://www.aham.org/AHAM/What_We_Do/Certification_Programs/AHAM/What_We_Do/Certification_Programs.aspx?hkey=f21f2894-3b5e-4ae9-bad4-19515b8a6159. Último acceso 20/2/2021.

AHAM. Assoc. of Home Appliance Manufacturers. <https://ahamverifide.org/wp-content/uploads/2020/09/Testing-of-Portable-Air-Cleaner-Performance-FAQs-2020-Updates.pdf>. Último acceso 20/2/2021.

AHAMDIR. Assoc. of Home Appliance Manufacturers. Certified Room Air Cleaners. <https://www.ahamdir.com/room-air-cleaners/>. Último acceso 20/2/2021.

ANSI/AHAM AC-1:2006 Method for measuring performance of portable household electric room air cleaners, Association of Home Appliance Manufacturers, 2006.

ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017 Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size.

ASHRAE 185.1-2020. Method of Testing UV-C Lights for Use in Air-Handling Units or Air Ducts to Inactivate Airborne Microorganisms.

ANSI/ASHRAE Standard 185.2-2014. Method Of Testing Ultraviolet Lamps For Use In HVAC And R Units Or Air Ducts To Inactivate Microorganisms On Irradiated Surfaces.

ASHRAE, 2011. Emerging Issue Reports: The Ozone and Indoor Chemistry Emerging Issue Report. ASHRAE Environmental Health Committee (EHC), January 2011.

ASHRAE 2021. In-room air cleaner guidance for reducing COVID19 in air in your space/room, Ashrae, 2021.

ATECYR DTIE 2.07 Las instalaciones de climatización, SARS-CoV-2 y la calidad de aire. <https://www.atecyr.org/publicaciones/es/dtie/114-dtie-207-las-instalaciones-de-climatizacion-sars-cov-2-y-calidad-de-aire.html>. Último acceso 20/2/2021.

Badali, K. M., Zhou, S., Aljawhary, D, Antinolo, M, Chen, W. J., Lok, A., Mungall, E., Wong, J.P.S., Zhao, R., Abbatt, J.P.D. (2015) Formation of hydroxyl radicals from photolysis of secondary organic aerosol material. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 7831-7840. <https://doi.org/10.5194/acp-15-7831-2015>

Bazant, M.Z. and Bush J.W.M, (2021) A guideline to limit indoor airborne transmission of COVID-19. *Proceedings of the National Academy of Science* 118 (17) <https://doi.org/10.1073/pnas.2018995118>

Bell, M.L., Peng, R.D., Cominici, F. (2006). The exposure-Response Curve for Ozone and Risk of Mortality and the Adequacy of Current Ozone Regulations. *Environmental Health Perspectives*, 114(4): 532-536. <https://doi.org/10.1289/ehp.8816>.

Bioflash® Biological Identifier 2021. <https://www.smithsdetection.com/products/bioflash-biological-identifier/>. Último acceso 30/04/2021.

CARB. California Air Resources Board. Evaluation of Pollutant Emissions from Portable Air Cleaners. Final Report: Contract No. 10-320, California Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency Research Division, 2014.

Buonanno, M., Welch, D., Shuryak, I. & Brenner, D.J. (2020). Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. *Scientific Reports*, 10, Article number: 10285.

CARB. California Air Resources Board. List of CARB-Certified Air Cleaning Devices. <https://ww2.arb.ca.gov/list-carb-certified-air-cleaning-devices>. Último acceso 20/2/2021.

Courty, J.M., Kierlik, E. (2020). ¿Cómo funcionan las mascarillas de protección respiratoria? Investigación y Ciencia, Mayo 2020.

Curtius, J., Granzin, M. & Schrod, J. (2021). Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2. *Aerosol Science and Technology*, 55(5), 586-599 <https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1877257>

EPA, 2018. EPA residential air_cleaners. A technical summary 3rd_edition.

EPA, 2020. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-ionizers-and-other-ozone-generating-air-cleaners>. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/ozone-generators-are-sold-air-cleaners>. Último acceso 20/2/2021

EMG: Potential application of air cleaning devices and personal decontamination to manage transmission of COVID-19, 4 November 2020. <https://www.gov.uk/government/publications/emg-potential-application-of-air-cleaning-devices-and-personal-decontamination-to-manage-transmission-of-covid-19-4-november-2020>. Último acceso 20/1/2021.

Eurovent. RS/4/C/002-2017 Rating Standard for the Certification of Air Cleaners, Eurovent Certita Certification, 2017.

Faraldos Izquierdo, M. (2016) Fotocatálisis: nanomateriales para combatir la contaminación y obtener energía. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 41, 9-11

Finlayson-Pitts, B. J., Pitts, J. N. Jr. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere. Theory, Experiments, and Applications, Capítulo 6. *Rates and Mechanisms of Gas-Phase Reactions in Irradiated Organic – NO_x – Air Mixtures*. Ed. Elsevier Inc. 2000.

FDA 2021, <https://www.fda.gov/medical-devices/coronavirus-covid-19-and-medical-devices/uv-lights-and-lamps-ultraviolet-c-radiation-disinfection-and-coronavirus>. Último acceso 01/4/2021

Gallimore, P. J., Mahon, B. M., Wragg, F. P. H., Fuller, S. J., Giorio, C., Kourtchev, I., Kalberer, M. (2017) Multiphase composition changes and reactive oxygen species formation during limonene oxidation in the new Cambridge Atmospheric Simulation Chamber (CASC). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 9853–9868. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9853-2017>

Gomez Alvarez, E., Amedro, D.; Afif, C., Gligorovski, S., Schoemaeker, C., Fittschen, C., Doussin, J. F., Wortham, H. (2013). Unexpectedly high indoor hydroxyl radical concentrations associated with nitrous acid. *PNAS*. 110, 13294-13299. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308310110>

Greenhalgh, T., Jimenez, J.L., Prather, K.A., Tufekci, Z., Fisman, D. & Schooley, R. (2021). Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. *The Lancet* (In press). [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00869-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00869-2)

Grignani, E., Mansi, A., Cabella R., Castellano, P., Tirabasso A., Sisto, R., Spagnoli, M., Fabrizi, G., Frigerio, F., Tranfo, G. (2021). Safe and Effective Use of Ozone as Air and Surface Disinfectant in the Conjunction of Covid-19, *Gases*, 1, 19–32. <https://doi.org/10.3390/gases1010002>

GTM 2020. Grupo de Trabajo Multidisciplinar para la COVID-19, (2020). Informe sobre COVID-19 en espacios interiores, en particular restaurantes. https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/GTM_Restaurantes.pdf. Último acceso 21/04/2021.

Hallquist, M., Wenger, J.C., Baltensperger, U., Rudich, Y., Simpson, D., Claeys, M., Dommen, J., Donahue, N.M., George, C., Goldstein, A.H., Hamilton, J.F., Herrmann, H., Hoffmann, T., Iinuma, Y., Jang, M., Jenkin, M.E., Jimenez, J.L., Kiendler-Scharr, A., Maenhaut, W., McFiggans, G. Mentel, Th.F., Monod, A., Prévôt, A.S.H., Seinfeld, J.H., Surratt, J.D., Szmigielski, R. and Wildt, J. (2009). The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 5155–5236. <https://doi.org/10.5194/acp-pequeñas9-5155-2009>

Hay S.O., Obee T.N. and Thibaud-Erkay C. (2010). The deactivation of photocatalytic based air purifiers by ambient siloxanes. *Applied Catalysis B: Environmental*, 99, 445–431. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.06.018>

HSE. Health and Safety Executive. EH40/2005 Workplace exposure limits Containing the list of workplace exposure limits for use with the Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002. (Fourth Edition 2020), London.

Huffman, J.A., Perring, A.E., Savage, N.J., Clot, B., Crouzy, B., Tummon, F., Shoshanim, O., Damit, B., Schneider, J., Sivaprakasam, V., Zawadowicz, M.A., Crawford, I., Gallagher, M., Topping, D., Doughty, D.C., Hill, S.C. & Pan. Y. (2019). *Aerosol Science and Technology*, 54:5, 465-495 <https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1664724>

IEC/AWI 63086-2-1 Household and similar electrical air cleaning appliances - Methods for measuring the performance - Part 2-1: Particular requirements for determination of reduction of particles.

IEC 63086-1:2020. Household and similar electrical air cleaning appliances - Methods for measuring the performance - Part 1: General requirements.

IEC 60335-2-65:2002 Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-65: Particular requirements for air-cleaning appliances, International Electrotechnical Commission, 2002.

Jiménez, J.L. & Pen, Z. (2021). <http://tinyurl.com/covid-estimator> Último acceso 18/4/2021

KACA (2006) Room air cleaner standard, Seoul, Korea, Korea Air Cleaning Association, SPS-KACA002-132.

Kontrol BioCloud, 2021. <https://www.kontrolbiocloud.com/> Último acceso 30/04/2021.

Kowalski, W. and Bahnfleth, W. (2004). Proposed Standards and Guidelines for UVGI Air Disinfection. *Environmental Science*.

Kujundzic, E., Matalkah, F., Howard, C. J., Hernández, M. & Miller, S. L. (2006). UV air cleaners and upper-room air ultraviolet germicidal irradiation for controlling airborne bacteria and fungal spores. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3, 536–546. <https://doi.org/10.1080/15459620600909799>

Ma, J., Du, M., Wang, C., Xie, X., Wang, H., Zhang, Q. (2021). Advances in airborne microorganisms detection using biosensors: A critical review. *Environmental Science and Engineering* 15(3): 47. <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1420-8>

Miller-Leiden, S., Lobascio, C. & Nazaroff, W. W. (1996). Effectiveness of In-Room Air Filtration and Dilution Ventilation for Tuberculosis Infection Control. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46, 869–882. <https://doi.org/10.1080/10473289.1996.10467523>

MICINN 2020. Ministerio de Ciencia e Innovación (2020). Informe científico sobre vías de transmisión SARS-CoV-2 https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Prensa/FICHEROS/Informe_aerosoles_COVID/MCienciaInnov.pdf Última consulta 21/04/2021.



MSCBS 2020. Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social (2020). Nota informativa sobre dispositivos purificadores de aires y otros dispositivos para la desinfección de superficies.

Nature Editors (2021). Coronavirus is in the air — there's too much focus on surfaces. <https://www.nature.com/articles/d41586-021-00277-8>

NF-536 Certification rules for NF-Air Cleaners, Eurovent Certita Certification, 2016. <http://www.certita.fr/en/certita-mark/nf-air-cleaners>. Último acceso 20/1/2021.

NF-B44-200:2016 Independent air purification devices for tertiary sector and residential applications - Test methods - Intrinsic performances, AFNOR, 2016.

NIOSH. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Ultraviolet Radiation. DHHS (NIOSH) Publication Number 73-11009, 1972.

Pan M. et al., (2019). Collection, particle sizing and detection of airborne viruses. *Journal of Applied Microbiology*, 127, 1596--161.

Pen, Z & Jiménez, J.L., (2021). Exhaled CO₂ as a COVID-19 Infection Risk Proxy for Different Indoor Environments and Activities. *Environmental Science and Technology Letters*. (To appear) <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00183>

Plantower, 2021. <http://plantower.com/en/> Último acceso 18/04/2021.

Purple Air, 2021. <http://www.purpleair.com> Último acceso 18/04/2021.

Research and Markets, 2020. Air Purifier Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (HEPA, Activated Carbon, Ionic Filters), By Application (Commercial, Residential, Industrial), By Region, And Segment Forecasts, 2020 - 2027.

RITE, 2007. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (BOE 29/08/2007).

Rudnick, S.N. & Milton, D.K., (2003), Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *International journal of indoor environment and health* 13(3), 237-24. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x>

Tsung-Hung Li, Barbara J Turpin, Helen C Shields, Charles J Weschler. (2002). Indoor hydrogen peroxide derived from ozone/d-limonene reactions. *Environmental Science & Technology*, 36, 3295-3302.

UL 2998. Environmental Claim Validation Procedure (ECVP) for Zero Ozone Emissions from Air Cleaners, UL ECVP 2998. 2020.

UNE-EN 1822-1:2020. Filtros absolutos (EPA, HEPA y ULPA). Parte 1: Clasificación, principios generales del ensayo y marcado.

UNE-EN ISO 29463-3:2019. Filtros de alta eficacia y medios filtrantes para la eliminación de partículas en el aire. Parte 3: Método de ensayo de medio filtrante plano. (ISO 29463-3:2011).

UNE-EN 16846-1:2019. Fotocatálisis. Medición de la eficiencia de los dispositivos fotocatalíticos utilizados para la eliminación en modo activo de VOC y olores en el aire interior. Parte 1: Método de ensayo por lotes en cámara cerrada.

UNE-EN IEC 63086-1:2020. Purificadores de aire electrodomésticos y análogos. Métodos de medida de la aptitud para la función. Parte 1: Requisitos generales.

UNE-EN ISO 16000-26:2014. Aire de interiores. Parte 26: Estrategia de muestreo del dióxido de carbono (CO₂). (ISO 16000-26:2012).

UNE-EN ISO 16890-1:2017. Filtros de aire utilizados en ventilación general. Parte 1: Especificaciones técnicas, requisitos y clasificación según eficiencia basado en la materia particulada (PM). (ISO 16890-1:2016).

UNE-EN ISO 15858:2017. Dispositivos UV-C. Información sobre seguridad. Límites admisibles para la exposición humana. (ISO 15858:2016).

XP-B44-200:2011 Independent air purification devices for tertiary sector and residential applications-Test methods - Intrinsic performances, AFNOR, 2011.

XP-B44-013:2009 Photocatalysis - Test and analysis method for determining the efficiency of photocatalytic systems for eliminating volatile organic compounds/odours in recirculating interior air - Confined chamber test, AFNOR, 2009

Zhang, Y. et al. (2011). Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review. *Atmospheric Environment*, 45, 4329–4343.

Anexo I. Resumen de las tecnologías empleadas en los limpiadores de aire [EPA 2018]

Tecnología empleada para limpiar el aire interior	Contaminantes específicos del aire interior	Mecanismos de acción	Ventajas	Inconvenientes	Ensayos estándar estándares de prueba (y métricas de calificación)
Medios filtrantes fibrosos	Partículas	Retención: las fibras filtrantes retienen partículas • Los medios de filtración mecánica se basan únicamente en fuerzas mecánicas • Los medios con carga electrostática (es decir, "electret") utilizan fibras mecánicas con una carga electrostática aplicada para recolectar partículas con carga opuesta, mejorando la eficacia de eliminación	• Si la eficacia nominal es alta, pueden tener excelentes capacidades de eliminación para muchos tamaños de partículas. • Los filtros de eficacia media mecánicos ven una eficacia mejorada con la carga	• Se requiere reemplazo regular. • Los filtros de partículas usados pueden ser una fuente de contaminación sensorial / olores. • Las elevadas altas caídas de presión en algunos filtros de medios fibrosos pueden afectar negativamente a los sistemas HVAC. • Los filtros de medios "electret" reducen su eficacia con la carga • Diferencias entre distintas normas de ensayo y categorías de filtros (EEUU y Europa)	Filtros: • Norma ANSI/ASHRAE 52.2 (MERV) • ISO 16890 (ePM) • ISO 1822 y 29463 (HEPA) • Estándares de prueba patentados (FPR, MPR) Limpiadores de aire autónomos: • AHAM AC-1 (CADR)
Precipitación electrostática (ESP, <i>Electrostatic precipitation</i>)	Partículas	Retención: las partículas entrantes se cargan mediante una descarga corona y se acumulan en placas con carga opuesta	• Pueden tener una alta eficacia de eliminación para una amplia gama de tamaños de partículas • Baja caída de presión e impactos mínimos en los sistemas HVAC • Bajos requisitos de mantenimiento	• A veces, los ESP generan altas cantidades de ozono y óxido de nitrógeno. • La eficacia generalmente disminuye con la carga y las placas requieren limpieza. • Requisitos de alto consumo de energía eléctrica	Norma ANSI/UL 867 para la seguridad eléctrica y emisiones de ozono (similar a IEC 60335-2-65:2002)
Generadores de iones o ionizadores	Partículas	Retención: al igual que los ESP, los ionizadores utilizan un cable de alto voltaje o un cepillo de fibra de carbono para cargar eléctricamente las moléculas de aire, lo que produce iones negativos que se adhieren a las partículas en el aire; las partículas cargadas se recogen en placas con carga opuesta en el filtro de aire o son atraídas a otras superficies de la habitación y son depositadas en otro lugar de la misma.	• Requisitos de consumo de energía típicamente bajos • Silencioso • Bajo mantenimiento	• Genera ozono • Por lo general, baja eficacia debido a velocidades de flujo de aire y tasas de suministro de aire limpio (CADRs) muy bajas.	Ninguno específico para ionizadores, aunque AHAM AC-1 se puede utilizar para medir CADR
Irradiación con ultravioleta germicida (UVGI, <i>ultraviolet germicidal irradiation</i>)	Microorganismos	Inactivación: la luz ultravioleta inactiva los microorganismos en el aire	• Puede ser eficaz a alta intensidad con suficiente tiempo de contacto. • Puede usarse para inactivar microorganismos bacterias de refrigeración y otras superficies	• Las lámparas sin revestimiento pueden generar ozono • Potencial de causar lesiones oculares • La eficacia aumenta con la intensidad de la lámpara, que suele ser baja en los limpiadores de aire UVGI residenciales. • Requisitos de alto consumo de energía eléctrica • Inactiva pero no elimina los microbios	Irradiación del aire: • Norma ANSI/ASHRAE 185.1 Irradiación de superficies: • Norma ANSI/ASHRAE 185.2
Medios adsorbentes	Gases	Adsorción: los gases se adsorben físicamente en medios de gran superficie (normalmente carbón activado)	• Potencial para una alta eficacia de eliminación de muchos contaminantes gaseosos en limpiadores con una cantidad suficiente de adsorbente para la aplicación • Sin formación de subproductos	• Se requiere una sustitución regular del adsorbente porque su capacidad de adsorción es limitada, ya que la adsorción física es un proceso reversible, lo que significa que los contaminantes pueden no ser retenidos permanentemente • Se desconoce la eficacia de muchos sistemas domésticos que poseen pequeñas cantidades de carbón activado.	Medios: • Norma ANSI / ASHRAE 145.1 (sin métrica de clasificación) Limpiadores de aire en conductos: • Norma ANSI / ASHRAE 145.2 (sin métrica de clasificación) Sin ensayos de eficacia.

				• Las altas caídas de presión en algunos filtros de medios adsorbentes pueden afectar negativamente a los sistemas HVAC • Diferente eficacia en la eliminación de diferentes gases a diferentes concentraciones. • Los métodos de ensayo normalizados no se utilizan ampliamente	
Medios quimisorbentes	Gases	Adsorción: Los gases se adsorben químicamente sobre un medio recubierto o impregnado con un compuesto reactivo.	• Potencial para proporcionar una alta eficacia de eliminación de muchos contaminantes gaseosos • La quimisorción es un proceso irreversible, lo que significa que los contaminantes se retienen en la superficie del adsorbente permanentemente	• Se requiere una sustitución regular del adsorbente porque pierde su capacidad de quimisorción • Se desconoce la eficacia y efectividad de muchos sistemas para consumidores. • Las altas caídas de presión en algunos filtros de medios adsorbentes pueden afectar negativamente a los sistemas HVAC • Diferente eficacia de eliminación para diferentes gases a diferentes concentraciones.	Medios: • Norma ANSI / ASHRAE 145.1 (sin métrica de clasificación) Limpiadores de aire en conductos: • Norma ANSI / ASHRAE 145.2 (sin métrica de clasificación) Sin ensayos de eficacia
Oxidación catalítica	Gases	Conversión: la mayoría utiliza oxidación fotocatalítica (PCO) en la que se recubre un medio de gran superficie con dióxido de titanio como catalizador; Los gases entrantes se adsorben en el medio y las lámparas UV irradian y activan el dióxido de titanio, que reacciona con los gases adsorbidos para transformarlos químicamente.	• Puede degradar una amplia gama de contaminantes gaseosos (por ejemplo, aldehídos, compuestos aromáticos, alcanos, olefinas, hidrocarburos halogenados) • Se puede combinar con medios adsorbentes para mejorar la eficacia.	• Puede generar subproductos nocivos como formaldehído, acetaldehído y ozono. • No hay métodos de ensayo normalizados • A menudo, poseen una eficacia de eliminación relativamente baja y variable para muchos gases de interior • Falta de estudios de campo para validar su funcionamiento • El catalizador a menudo tiene una vida útil finita • Los virus solo son inactivados si se depositan en la superficie. Pero en ese caso ya no eran problemáticos dado que se quedan allí.	Ninguna específica para PCO
Plasma	Gases	Conversión: se aplica una corriente eléctrica para crear un arco eléctrico; los gases entrantes se ionizan y los enlaces se rompen para transformar químicamente los contaminantes gaseosos	• Pueden tener una alta eficacia de eliminación • Se pueden combinar con otras tecnologías de limpieza de aire (por ejemplo, PCO) para mejorar el rendimiento y minimizar la formación de subproductos.	• La amplia variedad de tipos de generación de plasma genera confusión sobre cómo funciona realmente un producto • Subproductos como partículas, ozono, formaldehído, monóxido de carbono, cloroformo, óxidos de nitrógeno y una gran cantidad de otros compuestos orgánicos, se forman a partir de muchas tecnologías de plasma • La mayoría de las investigaciones se han centrado en la eliminación de gases, mientras que hay pocos estudios sobre la eliminación de partículas.	Ninguna específica para plasma
Generadores de ozono	Gases	Conversión: la generación intencional de ozono mediante descarga de corona, radiación ultravioleta u otro método para oxidar compuestos olorosos y otros gases.	• Reacciona con muchos contaminantes gaseosos de interior • Puede combinarse con otras tecnologías menos perjudiciales como los medios adsorbentes.	• Tasas de generación de ozono altas • Formación de una gran cantidad de subproductos • Puede causar también la degradación de materiales presentes en el espacio interior	Ninguna específica para los generadores de ozono

Anexo II. Métrica de equipos LA

II.1. Métrica para equipos LA. *Key performance indicators*

La eficacia de un equipo LA puede determinarse realizando un solo paso de aire por el equipo o bien ensayando el equipo LA en una cámara de ensayo de determinado volumen, donde el aire puede circular varias veces a través del equipo.

La eficacia de un solo paso es la forma más básica de describir las prestaciones de un equipo LA. La eficacia depende del diseño del equipo LA y del contaminante tratado. En el caso de las partículas/aerosoles, la eficacia es función del tamaño de partícula e indica la fracción de partículas retenidas por el equipo LA respecto a las partículas en el aire que existían en la entrada antes del equipo. No obstante, hay que hacer notar que esta eficacia se refiere solo al filtro, por lo que para valorar correctamente la eficacia del equipo LA hay que indicar dos parámetros: la eficacia de retención de partículas de un tamaño o rango de tamaños determinado alcanzada por el filtro y el caudal de aire que pasa a través de ese filtro y es tratado.

Así pues, una métrica importante del equipo LA es el caudal de aire, ya que aunque un equipo LA tenga un filtro de alta eficacia y esté certificado, si el caudal es bajo, el equipo puede no ser suficiente para un local o espacio determinados. La eficacia de un solo paso no considera la mezcla del aire limpio de salida del equipo LA con el aire del local.

II.1.1. Métrica para equipos limpiadores de aire: Clean Air Delivery Rate y el número de ocupantes

Debido a las limitaciones expuestas, la tasa o caudal de suministro de aire limpio, CADR, es empleado para evaluar la eficacia de los equipos LA. El CADR se especifica para un tamaño o rango de tamaños de partícula y se define como el caudal de aire para el que se ha retenido las partículas de ese rango. El CADR equivale al producto del caudal de aire que circula por el equipo por la eficacia global de filtración, debida a la propia del filtro y a que puede existir cierta fracción del flujo de aire que en realidad no atraviesa el material filtrante. En EEUU se expresa en pies cúbicos por minuto (cfm) ($1 \text{ cfm} = 1,699 \text{ m}^3/\text{h}$).

La asociación de fabricantes de electrodomésticos de EEUU (AHAM, *Association of Home Appliance Manufacturers*) ensaya y certifica los equipos LA para tres tamaños de partículas: humo (0,09 a $1 \mu\text{m}$), polvo (0,5 a $3 \mu\text{m}$) y polen (0,5 a $11 \mu\text{m}$) [AHAM 2020]. Los ensayos de AHAM se realizan en una cámara cerrada de 1008 pies cúbicos ($28,4 \text{ m}^3$) mediante el método de caída de contaminante (ver Figura II.1.).

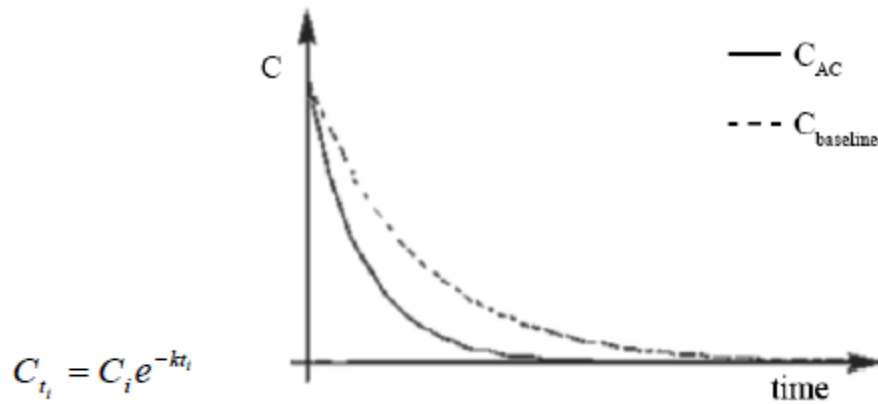


Figura II.1. Tendencia de caída de la concentración de un contaminante por limpieza de aire.

En este método se eleva la concentración de un contaminante en la cámara y se verifica la constante de caída del mismo con el tiempo, k_n , que corresponde a la infiltración de aire ‘limpio’ y a la velocidad de deposición. Posteriormente, se repite la prueba con el equipo LA funcionando, que corresponde a la infiltración de aire a la velocidad de deposición y a la capacidad del equipo LA de retener partículas (k_e). De esta forma, se determina el valor de CADR, en m^3/h , como el producto del volumen de aire (V en m^3) por la diferencia de las constante de caída k_e y k_n . Todo ello referido a un volumen de 1008 pies cúbicos ($28,4 \text{ m}^3$) que tiene de volumen la cámara de referencia para realizar el test:

$$CADR = V(k_e - k_n)$$

Por tanto, el CADR solo tiene en cuenta las partículas retenidas por el equipo LA, independientemente de la deposición de partículas en superficies y la infiltración de aire del local. La figura II.2 muestra una etiqueta típica de AHAM para equipos LA. En la etiqueta se especifica la superficie de local para el que se recomienda (suponiendo una altura del local de 8 pies = 2,43 m y 5 ACH (del inglés *Air Changes per Hour*) así como el valor de CADR ensayado para los tres rangos de partículas indicados: humo, polvo y polen.

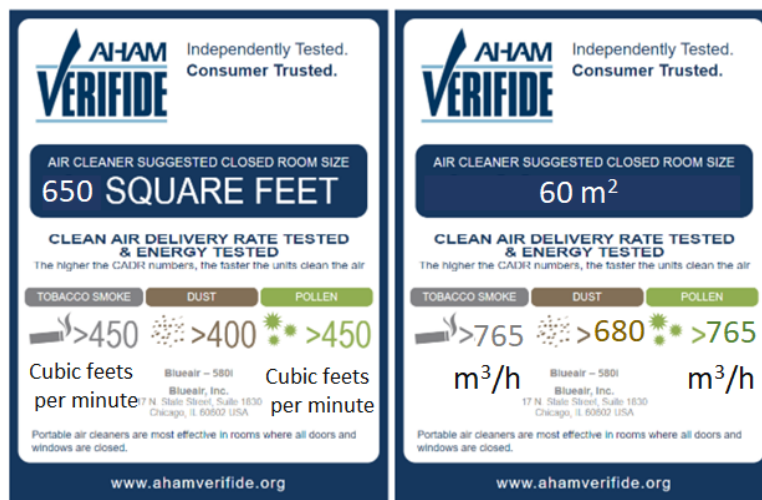


Figura II.2. Ejemplo de etiqueta típica de AHAM para equipos LA ensayados apropiados para un espacio de 650 pies cuadrados (60 m²) si la renovación de aire objetivo es 5 ACH. Las unidades son pies cúbicos por minuto o m³/h.

El CADR puede aplicarse a distintas tecnologías LA. La figura II.3 muestra un resumen de algunos valores de CADR en m³/h para equipos LA que emplean distintos tipos de tecnologías [Zhang 2011]. El CADR necesario varía según las características del espacio y su ocupación.

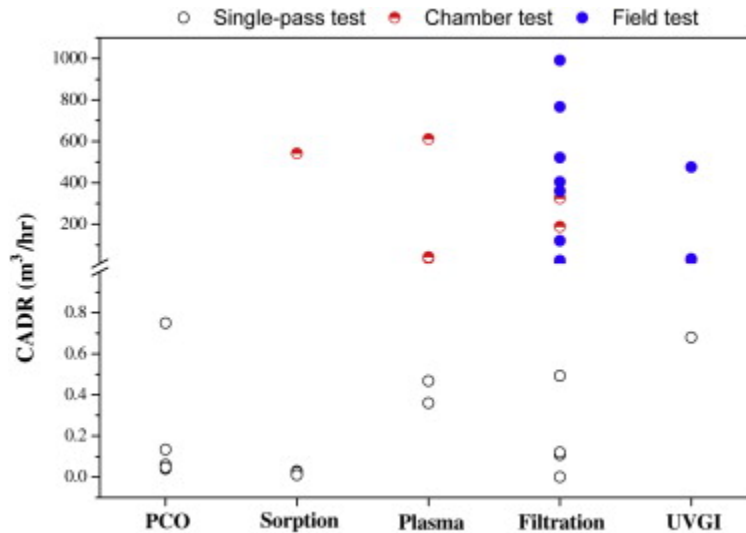


Figura II.3. Ejemplo con algunos valores de CADR en m³/h para equipos LA que emplean distintos tipos de tecnologías [Zhang 2011].

II.1.2. Métrica para equipos LA: eficacia de limpieza

La eficacia, ϵ , del equipo LA es la relación entre la velocidad de eliminación de contaminante del equipo LA respecto a la velocidad de eliminación base por deposición y ventilación. La eficacia describe cómo de bien se elimina un contaminante comparado con otros procesos de eliminación típicos. Se expresa como

$$\epsilon = \frac{C_{baseline} - C_{AC}}{C_{baseline}} = \frac{CADR}{V(\lambda_v + \lambda_d) + CADR}$$

siendo $C_{baseline}$ la concentración de contaminante cuando el equipo LA no está funcionando, C_{AC} la concentración de contaminante con el equipo LA funcionando, λ_v la eliminación de contaminante por infiltración y λ_d la eliminación de contaminante por deposición en superficies.

El programa de equipos LA de AHAM [ANSI/AHAM AC-1:2006] y [AHAM 2015] recomienda una eficacia del 80% en equipos LA.

II.1.3. Métrica para equipos LA: eficacia de limpieza y eficiencia energética

De acuerdo al programa de certificación de eficiencia energética de Eurovent [Eurovent RS/4/C/002-2017], la eficiencia energética del equipo LA se determina de acuerdo al indicador de

Eficiencia de limpieza de aire CAE (*Clean Air Efficiency*) para cada una de las cuatro categorías de contaminantes: partículas/aerosoles, gases, microorganismos y alérgenos (ver tabla II.1.)

Tabla II.1. Categorías de eficiencia energética para equipos LA (según Eurovent RS/4/C/002-2017).

<i>Clean Air Efficiency class</i>	<i>Clean Air Efficiency value</i>
A	$13 \text{ m}^3/\text{h/W} \leq \text{CAE}$
B	$7 \text{ m}^3/\text{h/W} \leq \text{CAE} < 13 \text{ m}^3/\text{h/W}$
C	$5 \text{ m}^3/\text{h/W} \leq \text{CAE} < 7 \text{ m}^3/\text{h/W}$
D	$2 \text{ m}^3/\text{h/W} \leq \text{CAE} < 5 \text{ m}^3/\text{h/W}$
E	$\text{CAE} < 2 \text{ m}^3/\text{h/W}$

La eficacia de los equipos LA frente a un total de once tipos de contaminantes según las cuatro categorías de contaminantes mencionadas se obtiene de las ratios siguientes:

- Eficacia frente a partículas/aerosoles en tres rangos (0,3-0,5; 1 a 2 y 3 a $5\mu\text{m}$), $i=1,2,3$

$$\text{Clean Air Efficiency}_{\text{particles}} = \frac{\text{Min}(Q_{AE1}; Q_{AE2}; Q_{AE3})}{P_{E\text{max}}}$$

- Eficacia frente a cinco gases: acetona, acetaldehído, heptano, tolueno, formaldehído, $i=4,\dots,8$

$$\text{Clean Air Efficiency}_{\text{gases}} = \frac{\text{Min}(Q_{AE4}; Q_{AE5}; Q_{AE6}; Q_{AE7}; Q_{AE8})}{P_{E\text{max}}}$$

- Eficacia frente a dos tipos de microorganismos: estafilococos epidermidis y aspergillus niger, $i=9, 10$

$$\text{Clean Air Efficiency}_{\text{micro-organisms}} = \frac{\text{Min}(Q_{AE9}; Q_{AE10})}{P_{E\text{max}}}$$

- (1) Eficacia frente a alérgenos: alérgenos Fel-D1 gatos, $i=11$

$$\text{Clean Air Efficiency}_{\text{allergens}} = \frac{Q_{AE11}}{P_{E\text{max}}}$$

En las fórmulas anteriores, Q_{AEi} es el caudal volumétrico de aire limpio para el contaminante identificado con el índice “i”, para $i=1,\dots,11$, y $P_{E\text{max}}$ [W] es la potencia eléctrica absorbida por el equipo LA a máxima velocidad.

La información resultante de los ensayos de verificación de los equipos LA se recoge en una etiqueta como la mostrada como ejemplo en la Figura II.4. En la etiqueta, la superficie de local recomendada en m^2 es la máxima de las superficies calculadas para cada contaminante (ver norma NF 536). En la etiqueta se recoge “hasta X m^2 ” donde X es la superficie de local recomendado. Se considera que la altura del local es 2,5 m.

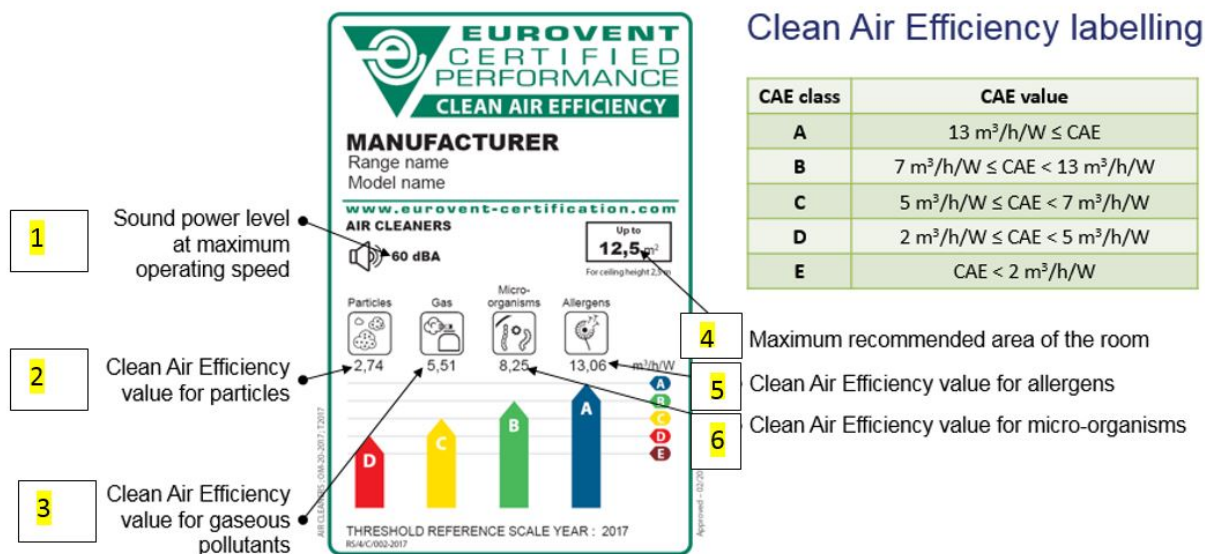


Figura II.4. Ejemplo de etiqueta EUROVENT para la eficacia de limpieza para partículas, gases, microorganismos y alérgenos, teniendo en cuenta la eficiencia energética.

II.1.4. Métrica para equipos LA: otros indicadores

Otros aspectos relacionados con la métrica a tener en cuenta:

- Ruido, potencia sonora (en dB) que produce el equipo LA operando a máximo caudal.
- Masa total de contaminante acumulada (mg) que es capaz de retener el equipo LA cuando el CADR del equipo LA disminuye al 50% de su valor inicial.
- Para equipos de filtración, CADR del equipo cuando se activa el indicador de filtro colmatado.

Anexo III. Normativa de ensayos experimentales de equipos LA

III.1. Normativa de ensayos experimentales de equipos LA

Por razones de seguridad y eficacia, los equipos LA requieren de un procedimiento de ensayo experimental para evaluar la capacidad de limpiar el aire y la generación de subproductos que podrían resultar nocivos para la salud de las personas. En la tabla III.1. se resumen algunas normas de distintos países que sirven para evaluar las prestaciones de los equipos LA autónomos así como los instalados en conductos [Afshari 2020].

Tabla III.1. Resumen de normas de distintos países que sirven para evaluar las prestaciones de los equipos LA autónomos, así como los equipos instalados en conductos [Afshari 2020].

Table 1. Standards and procedures for evaluating the initial performance of electrostatic precipitators (ESPs) in portable air cleaning (PAC) and in-duct systems.

Standard/Protocol (Ref.)	Country	Method	Challenge Particles	Measured Particle Size Range	Performance Index
Portable Air Cleaners					
ANSI/AHAM [17]	US	Pull-down	Environmental Tobacco Smoke Arizona Road Dust Paper Mulberry Pollen	0.1 to 1.0 μm 0.5 to 3.0 μm 5 to 11 μm	CADR ^a
GB/T-18801 [18]	China	Pull-down	Environmental Tobacco Smoke Arizona Road Dust Paper Mulberry Pollen	0.1 to 1.0 μm 0.5 to 3.0 μm 5 to 11 μm	CADR
NRC Protocol [27]	Canada	Pull-down	Polydisperse Potassium chloride (KCl)	50 nm to 5 μm	CADR
NCEMBT Procedure [28]	US	Pull-down	Polydisperse potassium chloride (KCl)	0.1 to 11.5 μm	CADR
Lucerne University (2012) [29]	Switzerland	Pull-down	ISO 12103-1 A1 Ultrafine test dust.	0.2 to 5 μm	
JIS C 9615 [30]	Japan	Single-pass	JIS Z 8901 standard dusts	...	Removal rate
XP B44-200 [31]	France	Single-pass	DEHS, cat allergens, <i>Staphylococcus epidermidis</i> <i>Aspergillus niger</i>	0.3 and 5 μm	SPE ^b , CADR
In-duct air cleaners					
ANSI/AHRI 681 [32]	US	Single-pass	Polydisperse potassium chloride (KCl)	0.3 μm to 10 μm	SPE

Notes: (a) CADR: clean air delivery rate; (b) SPE: single-pass efficiency.

III.2. Norma francesa NF 536 y el programa EUROVENT NF Mark

El programa Eurovent está basado en la norma francesa NF-B44-200:2016. Esta norma deriva de las normas de ensayo XP-B44-200:2011 y XP-B44-013:2009.

La norma NF-B44-200:2016 especifica once tipos de contaminantes de aire ambiente interior divididos en cuatro categorías: materia particulada, COVs, microorganismos y alérgenos. Además, la norma establece la medida de subproductos químicos que potencialmente pueden emitir los equipos LA, como O₃, CO, NO y NO₂, para verificar que el equipo no emite subproductos potencialmente perjudiciales para las personas. La norma NF-536 determina la eficacia de limpieza de aire para distintos contaminantes y la superficie de local recomendada y establece la clase de eficiencia energética del equipo LA.

III.3. SPS KACA 002-132 (Korea Air Cleaning Association)

La tabla III.2 [KACA 2006] resume las condiciones de prueba de equipos LA para la certificación de la KACA (*Korean Air Cleaning Association*). Propone aumentar la cámara de

ensayo donde se certifica el CADR hasta 40 m³. Se centra en la medida de la concentración en número de partículas de 0,3 µm de cloruro potásico (KCl) generadas con un generador de aerosoles a partir de una solución de dicho componente y luego seleccionando el tamaño de partícula a 0,3 µm para el test, con un *Differential Mobility Analyzer* (DMA), por ejemplo, y exige una retención mínima del 70%, valor que probablemente reduzca la contaminación por partículas, pero que es relativamente permisivo si se trata de eliminar aerosoles con carga vírica. Como ya se ha dicho, en el rango 0,1-0,3 µm es donde la eficacia del filtrado es menor y, si se retienen estas partículas en una alta proporción, es esperable que las más gruesas y las más finas se retengan en mayor proporción. También se requiere rapidez en la eliminación de partículas y un 60% de eficacia para amoníaco, ácido acético y acetaldehído, así como una generación de O₃ que produzca una concentración en la cámara de prueba inferior a 50 ppb (valor guía de la OMS de calidad del aire que no debe superarse nunca en concentraciones de 8 h) tras operar durante 24 h y no sobrepasar unos niveles de ruido de 45-55 dB.

Tabla III.2. Condiciones de prueba de equipos LA para la certificación de la KACA [KACA 2006)].

CA tests	SPS-KACA002-132 (Korea Air Cleaning Association)
Flow rate	- A test duct (0.6 x 0.6 m ²), Maximum flow rate - No requirement for CA certification
Collection Efficiency	- Potassium Chloride particles, based on number concentration of the 0.3 µm particles - Requirement for CA certification : more than 70%
Clean Air Delivery Rate	- A closed chamber (40±10 m ³), Potassium Chloride particles, based on number concentration of the 0.3 µm particles - Initial concentration : 10 ⁸ -10 ⁹ #/m ³ - During time when the particle concentration reaches 1/3 of the initial - No requirement for CA certification
Odor removal efficiency	- A closed chamber (4±0.1 m ³), Ammonia, acetic acid, Acetaldehyde - Initial concentration : 10-13 ppm - Requirement for CA certification : 60%
Ozone emission	- A closed chamber (40±10 m ³), 24 hours - Requirement for CA certification : less than 50 ppb
Noise level	- A anechoic room, 1 m from the top, front, back, right, left side of an air cleaner - Requirement for CA certification : less than 45 dB(~5 m ³ /min), 50 dB(5-10 m ³ /min), 55 dB(10 m ³ /min)

III.4. Metodología de ensayos para tecnologías UVGI

El tratamiento del aire con equipos basados en ultravioleta para desinfección de aire, UVGI, requiere una metodología específica que pruebe su eficacia en la inactivación de patógenos presentes en el aire. El diseño e instalación, así como los ensayos experimentales y puesta en servicio, son las fases que hay que vigilar cuando se emplean equipos basados en esta tecnología. Los ensayos de eficacia incluyen la verificación de la potencia UV empleada (campo radiante UV), así como la medida de concentraciones de patógenos en el aire antes y después de poner en marcha el equipo. Algunos de estos ensayos se resumen en la tabla III.3. y en la figura III.1.

Tabla III.3. Tipos de tests para filtración y tratamiento UV. [Kowalski 2004]

Ensayo	Variable medida	Objetivo	Ventaja(s)	Inconveniente(s)
Inyección de bioaerosol de control aguas arriba	Diferencia de concentraciones aguas arriba y aguas abajo	Bacterias o esporas de hongos	Indicador de eficacia de un solo paso	Es improbable que esté permitido
Muestreo de microflora	Diferencia de concentraciones aguas arriba y aguas abajo	Bacterias o esporas de hongos	No introduce nuevos aerosoles con bacterias	Los niveles de aerosoles convergen en estado estacionario y no conducen a resultados útiles
	Medida antes y después tras 2 semanas de operación del sistema	Bacterias o esporas de hongos	Sencillo	Ninguno
Lecturas del fotosensor	Campo radiante	No aplicable	Sencillo, no requiere muestreo de aire	La desinfección debe asumirse en función de las mediciones
Prueba de fugas del filtro	Diferencia de concentraciones aguas arriba y aguas abajo	Aerosoles	Garantiza las prestaciones del filtro si no se detectan fugas	Más costoso que una sencilla inspección visual

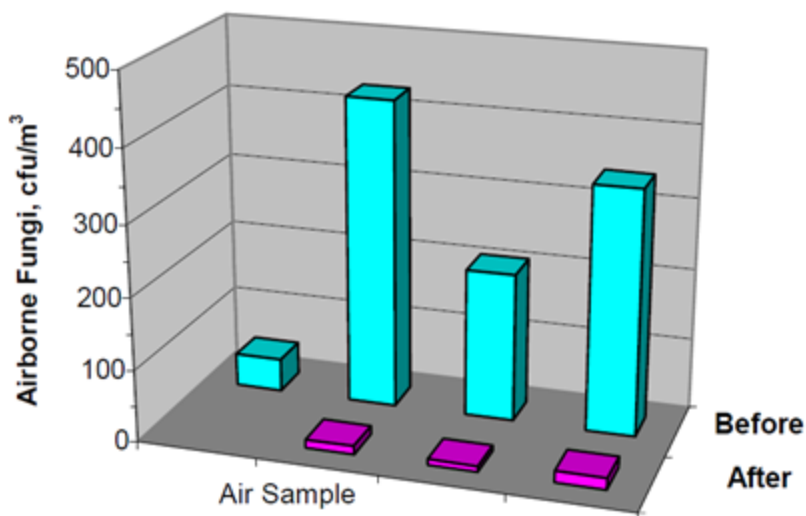


Figura III.1. Resultados de aplicación de UVGI instalado en modo recirculación en una habitación de hotel [Kowalski 2004]

A ello hay que sumar los ensayos de medida de posibles subproductos generados en el proceso, como es el caso del O_3 , o la generación de reacciones de nucleación de partículas ultrafinas a partir de contaminantes gaseosos, entre otros.

En España, la norma UNE-EN ISO 15858:2017 aplica a los sistemas UVC en conducto, de aire superior, dispositivos portátiles y otros equipos que puedan generar una exposición de personas a los UVC. La norma establece los requisitos mínimos de seguridad para las personas que se exponen a lámparas UVC (entre 200 y 280 nm).

III.5 Metodología de ensayos para tecnologías basadas en fotocátalisis

La medición de la eficiencia de los dispositivos LA basados en tecnologías de fotocátalisis se describen en la norma UNE-EN 16846-1:2019 sobre medición de la eficiencia de los dispositivos fotocatalíticos utilizados para la eliminación en modo activo de VOC y olores en el aire interior. Parte 1: Método de ensayo por lotes en cámara cerrada.

La fotocátalisis se centra en favorecer la oxidación de compuestos como NO_2 , y algunos COVs, como formaldehído, amoníaco y otros gases generadores de olores. Se necesita una fuente UV y, usando catalizadores, como nano-óxido de titanio (nano- TiO_2), por ejemplo, se favorece la fotooxidación. No solamente debe garantizarse la eficacia de dicha oxidación, sino que no se generen compuestos como O_3 por la radiación UV, ni que los procesos de oxidación generen otros compuestos perjudiciales para la salud, como O_3 , ácido nítrico, ácidos orgánicos, COVs oxigenados como formaldehído o partículas ultrafinas.

III.6. Norma Española UNE-EN IEC 63086-1 Limpiadores de aire

Esta norma española [UNE-EN IEC 63086-1:2020], vigente desde el 16/9/2020, está basada en la norma internacional [IEC 63086-1 2020] y recoge los métodos de medida de la aptitud para la función de limpiadores de aire. Se define limpiador de aire como “Aparato doméstico o similar alimentado eléctricamente que emplea una o varias tecnologías para reducir uno o más tipos de contaminantes”. También se definen tres categorías de contaminantes (partículas, contaminantes gaseosos y microorganismos) y se establecen tipos o categorías de tecnologías en limpiadores de aire (filtración mecánica, adsorción física y/o química, catálisis química, filtración electrostática, fotocátalisis, plasma, generación de ozono y generación de hidroxilo), coincidiendo esencialmente con lo que se desarrolla en el apartado 2 de este informe y se resume en la tabla del Anexo I [EPA 2018].

Esta norma establece las condiciones de ensayo de equipos LA en cámara de ensayo de 30 m^3 , manteniendo unas condiciones de $23 \pm 3^\circ\text{C}$ y $50 \pm 10\%$ de humedad relativa. El procedimiento de ensayo también se basa en el método de decrecimiento de contaminantes descrito en el Anexo II.1.1. En ella se define el CADR como el caudal de aire limpio (respecto al contaminante objetivo) suministrado por el equipo LA, calculado como el producto de la tasa de

decrecimiento por funcionamiento y el volumen de la cámara de ensayo asociado. Esta norma establece cómo determinar la tasa de intercambio de aire de la cámara de ensayo, pero no establece en detalle cómo determinar la tasa de decrecimiento por funcionamiento.

La norma establece la determinación de la eficiencia energética en modo de funcionamiento de rendimiento máximo como la relación entre la tasa de suministro de aire limpio en m^3/h y la potencia eléctrica consumida, en W. Esta norma no establece el procedimiento de ensayo ni de medición de subproductos generados por el equipo LA.

Se espera que se incorporen nuevas normas en España una vez se terminen de desarrollar otras internacionales [IEC/AWI 63086-2-1].

Anexo IV. Riesgos derivados del uso de equipos LA

Los equipos LA pueden generar algunos subproductos potencialmente nocivos para las personas. Algunos organismos internacionales como CDC (*United States Centers for Disease Control and Prevention*) y ASHRAE [ASHRAE 2021] advierten que el uso de equipos LA que emplean tecnologías que generan especies de oxígeno reactivo, ionizadores y similares deben acreditar que no producen subproductos tales como O_3 . Por ejemplo, CDC recomienda que el equipo LA debe cumplir la norma UL2998 [UL2998 2020] que garantiza que el equipo LA no emite concentraciones de O_3 perjudiciales para las personas.

Aparte del O_3 , los equipos LA pueden emitir una serie de subproductos como especies reactivas del oxígeno (ROS, *Reactive Oxygenated Species*), formaldehído, y partículas ultrafinas, entre otros [CARB 2014]. Un resumen de los potenciales riesgos derivados del uso de equipos LA se recoge en la tabla IV.1 [EMG 2020].

Tabla IV.1. Riesgos potenciales para la salud asociados con equipos de limpieza de aire [EMG 2020].

Riesgo	Impacto en la salud	Límite de seguridad en ambiente interior
Ozono	Irritación de vías respiratorias incluso en muy bajas concentraciones	Límite de exposición corta en el trabajo (15 min) 0,2 ppm ó 0,4 mg/m^3 [HSE 2020]
Formaldehído	Irritación de vías respiratorias incluso en muy bajas concentraciones, peligro para mucosas expuestas. Cancerígeno.	Límite de exposición corta en el trabajo (15 min) 2 ppm ó 2,5 mg/m^3 [HSE 2020]
Óxido nitroso	Irritación de vías respiratorias, agravamiento de dolencias respiratorias.	Límite de exposición corta en el trabajo (15 min) 1 ppm ó 1,91 mg/m^3 ; límite de exposición largo (8 h) 0,5 ppm ó 0,96 mg/m^3 [HSE 2020]
Partículas nano y ultrafinas	Similar a vapores inhalables y dependientes del residuo. También es relevante la ingestión de partículas y exposición dérmica.	NIOSH recomienda límite de exposición de 1 ug/m^3 para nanomateriales de carbono

UVC	Daño ocular e inflamación de córnea. Daño cutáneo similar a las quemaduras por exposición solar.	NIOSH recomienda límite de exposición de 6 mJ/cm ² para exposición larga (8h)
-----	--	--

En España, la norma UNE-EN ISO 15858:2017 establece que la exposición máxima admisible a los UVC es de 6 mJ/cm², valor coincidente con el establecido por el NIOSH (*The National Institute for Occupational Safety and Health*) [Niosh 1972].

El O₃ es un gas reactivo que puede desinfectar aire, superficies y aguas, eliminando virus, bacterias y hongos. Sin embargo, es peligroso para la salud y la exposición a este gas genera un riesgo elevado y una variedad de síntomas asociados con las vías respiratorias.

Distintos organismos internacionales [EPA 2020] han establecido una escala de seguridad para las personas basada en las concentraciones de O₃ en el aire. En dicha escala se establece que no existe impacto para la salud por debajo de 50 ppb de O₃ en aire (ver tabla IV.2). Sin embargo, el Comité de Salud Ambiental de ASHRAE [ASHRAE 2011] ha propuesto que la concentración de O₃ en aire debe ser inferior a 10 ppb para tener un ambiente interior seguro [Bell 2006].

Tabla IV.2. Escala de riesgo para las personas por exposición a distintas concentraciones de ozono en aire.

	Concentración de ozono en aire (ppb)	Índice de Calidad de Aire Interior	Efecto en la salud
	0-10	Ambiente interior seguro	Ninguno.
	10-50	Buena CAI	Ninguno.
	51-100	Moderada CAI	En algunos casos, las personas sensibles deben considerar la exposición prolongada.
	101-150	Insalubre para grupos sensibles	Grupos sensibles deben limitar exposición: problemas respiratorios, niños, ancianos
	151-200	Insalubre	Grupos sensibles deben evitar exposición prolongada: problemas respiratorios, niños, ancianos
	201-300	Muy insalubre	Grupos sensibles deben evitar cualquier exposición: problemas respiratorios, niños, ancianos