

Guía básica a la tecnología de partículas

Steven D. Kochevar, enero 2006

Parte I.

Partículas

En esta parte se describe la naturaleza física, los orígenes y el comportamiento de las partículas.

Partículas

Tipos y fuentes

Generalmente, hay tres tipos de partículas: orgánicas inertes, orgánicas viables e inorgánicas inertes. Las partículas orgánicas inertes provienen de materiales orgánicos no reactivos, que son materiales derivados de organismos vivos e incluyen los compuestos de carbono. Las partículas orgánicas viables son capaces de vivir, desarrollarse o germinar conforme a condiciones favorables; las bacterias y los hongos son ejemplos de compuestos orgánicos viables. Las partículas inorgánicas inertes son materiales no reactivos como arena, sal, hierro, sales de calcio y otros materiales basados en minerales.

En general, las partículas orgánicas provienen de materia viva a base de carbono, como animales y plantas, si bien no necesariamente las partículas estén todavía vivas. Las partículas inorgánicas provienen de materia que nunca estuvo viva, como los minerales. La célula de piel muerta es una partícula orgánica inerte, un protozoo es una partícula orgánica viable y un grano de polvo cúprico es una partícula inorgánica inerte.

Las partículas se generan a partir de una gran variedad de fuentes. Por lo general, las partículas inertes se desarrollan cuando se frota un elemento contra otro, como el polvo que se produce cuando se corta un trozo de madera. Los seres humanos despedimos muchos miles de partículas inertes a través de la muda continua de piel muerta. Los motores eléctricos generan partículas inertes cuando sus cepillos de alambre frotan contra los componentes giratorios. Los plásticos, cuando son expuestos a la luz ultravioleta, liberan lentamente partículas inertes.

Tamaño

En el contexto de los métodos de fabricación contemporáneos, las partículas más pequeñas lo son tanto que no se pueden considerar como contaminación destructiva. Esas partículas pequeñas son muchas veces más pequeñas que un átomo; se llaman *partículas subatómicas*. La siguiente familia más grande de partículas es la de los átomos, seguida de las moléculas, que son grupos de átomos.

La contaminación molecular es de particular interés en los entornos de fabricación de semiconductores que siguen la *ley de Moore*. En 1965, Gordon E. Moore (cofundador de Intel Corporation) afirmó que el número de transistores en un circuito integrado se duplica casi cada dos años. Al tener una *superficie* fija en el circuito integrado, la única forma de duplicar el número de transistores es achicando su tamaño. Esos transistores se reducen rápidamente a tamaños moleculares y la contaminación molecular puede limitar la eficacia de la fabricación.

Después de la contaminación molecular, varias de las aplicaciones de fabricación se concentran en partículas medidas en micrones. Estas partículas varían en tamaño desde bien debajo de un micrón (μm) hasta unos 100 μm . La longitud de un micrón es equivalente a la milésima parte de un milímetro.

Comparativamente hablando, 25.400 μm son iguales a una pulgada, un solo grano de sal mide unos 60 μm y un cabello humano mide entre 50 y 150 μm . El ojo humano medio no puede ver partículas más pequeñas que 40 μm . Es que las partículas más grandes que 100 μm y más pequeñas que 0,01 μm interesan muy poco en la mayor parte de los procesos de fabricación modernos. Las partículas más grandes que 100 μm se filtran fácilmente y las menores que 0,01 μm son demasiado pequeñas como para causar daños. Además, la Organización internacional de normalización (ISO) no cuenta con disposiciones para clasificar partículas menores que 0,1 μm

(llamadas *partículas ultrafinas*) ni partículas mayores que 5,0 μm (llamadas *macropartículas*). En la tabla 1 se enumeran algunas partículas comunes y sus tamaños relativos.

Contenido de partículas	Tamaño de partícula (en micrones)
Cabello	50 - 150 μm
Visible	50 μm
Virus de la influenza	0,07 μm
Polen	7 - 100 μm
Partículas de estornudo	10 - 300 μm
Polvo	0,1 - 100 μm
Bacterias	1,0 - 10 μm

Tabla 1: Tamaños de partículas comunes

Hay varias formas diferentes de medir una partícula. En la figura 1 se muestran los métodos normales que se emplean. Una esfera, perfilada abajo en línea de rayas, representa la partícula de una esfera de látex de poliestireno (PSL): una partícula sintética empleada para calibrar contadores de partículas y filtros de prueba.

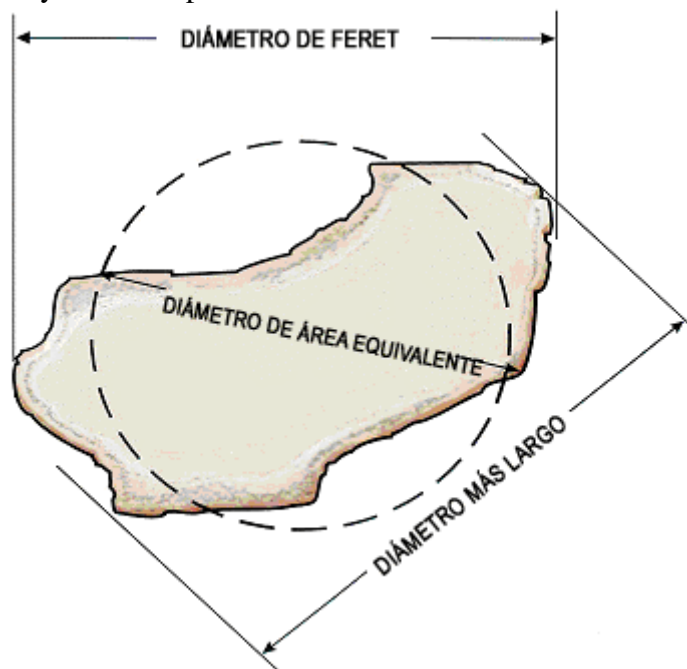


Figura 1: Dimensiones de partículas

El término científico para cada tipo de medición es útil en diferentes contextos, en especial en microscopía. El diámetro de Feret es la distancia medida entre líneas paralelas hipotéticas que se trazan tangencialmente al perfil de partícula y perpendicular a la escala ocular. Las partículas que caen sobre una superficie adoptarán su estado mecánicamente más estable, lo que significa que presentarán su superficie más grande al observador y, en consecuencia, su dimensión más larga.

Algunas partículas pueden cambiar en tamaño. Una partícula orgánica viable como un paramecio es un microorganismo que, como casi todos los animales, está compuesto mayormente de agua.

Si el paramecio se deseca (se seca), será mucho más pequeño que lo que era cuando estaba hidratado (lleno de agua).

El tamaño de las partículas es relevante en los procesos de fabricación. Según el proceso de limpieza, hay tamaños de partículas específicos que pueden causar daños. En la industria de los semiconductores, las partículas submicrónicas afectan la cantidad de chips que se pueden producir. En la industria de las unidades de disco, las partículas pueden dañar los cabezales de lectura/escritura. En la industria farmacéutica, las partículas más grandes pueden afectar la interacción de la droga con el cuerpo. Debido a que confiamos en que los filtros eliminen la mayor parte de la contaminación particular, conocer el tamaño de partícula relevante permitirá comprar filtros con el *tamaño de porosidad* correcto para eliminar la contaminación y aumentar la productividad.

Distribución en campana (distribución gaussiana)

Desde un punto de vista realista, los patrones de partículas rara vez tienen el tamaño exacto dentro de un canal de tamaño particular. Al utilizar partículas de $0,3 \mu\text{m}$ como ejemplo, la mayoría de las partículas son un poco más grandes o un poco más pequeñas que ese valor. Decimos que $0,3 \mu\text{m}$ es el tamaño *nominal* de la partícula porque es conveniente (en lugar de llamarlas, por ejemplo, “partículas de $0,2547 \mu\text{m}$ a $0,3582 \mu\text{m}$ ”). La cantidad que una partícula del tamaño nominal es la variancia. La variancia es igual al valor de la desviación normal elevado al cuadrado.

Si se mide con exactitud un número de partículas a un tamaño nominal de $0,3 \mu\text{m}$ y se grafican los resultados, el dibujo sería como el gráfico 3.

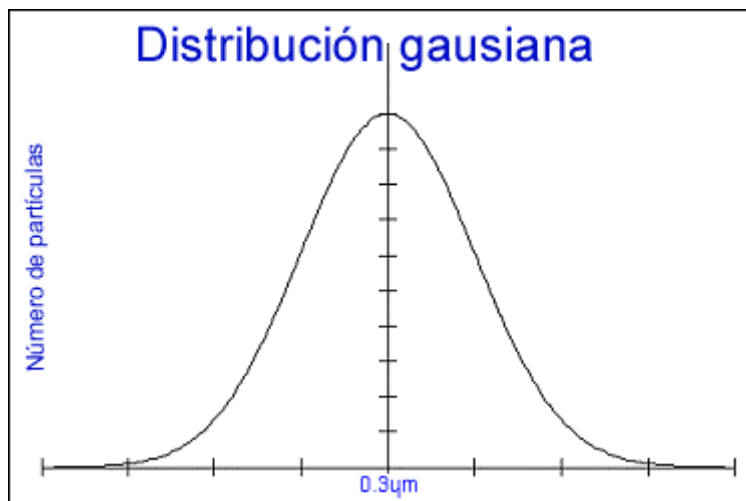


Gráfico 3: Distribución gaussiana (curva en campana)

En el gráfico, la mayor parte de las partículas se concentran en $0,30 \mu\text{m}$, con números menores de partículas más grandes o más pequeñas que $0,30 \mu\text{m}$. En un contador de partículas, aquellas que no caen dentro de la distribución normal (gausiana) serán incluidas en el siguiente depósito de partículas de tamaño más grande o más pequeño.

Concentraciones

Típicamente, en un pie cúbico normal de aire interior, podemos esperar 1.000.000 de partículas mayores que $0,5 \mu\text{m}$. Comparativamente hablando, en el medio del océano o en montañas elevadas, un pie cúbico de aire contiene sólo 34 partículas o 169 partículas (respectivamente), superiores a $0,5 \mu\text{m}$.

En los líquidos, un solo milímetro de agua ultra pura de una sala blanca contiene mucho menos que 1 partícula mayor que 0,05 μm . Sin embargo, un milímetro de agua potable puede contener 1.200.000 partículas mayores que 0,05 μm .

Al producir concentraciones de partículas significativas, los seres humanos desprenden alrededor de 1 onza de partículas cutáneas por día. El simple proceso de exhalar aire puede producir varios miles de partículas, en especial, de los fumadores. Sin embargo, el simple acto de beber un vaso de agua reduce significativamente las partículas que se exhalan. En la figura 2 se muestra cómo la actividad humana genera partículas.

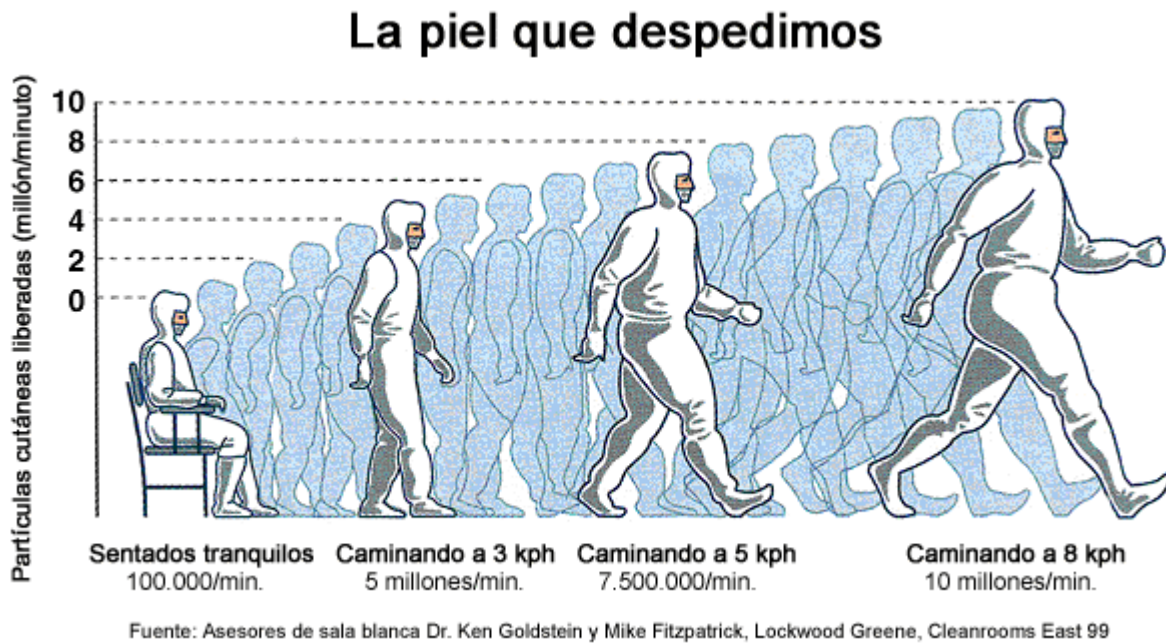


Figura 2: Generación de partículas

Distribuciones

Las partículas del aire y de líquidos en condiciones ambientales siguen una distribución de tamaños en común. Las distribuciones de partículas del aire obedecen a las normas relativas a salas blancas de la ISO 14644 que suponen una distribución conforme a una ley potencial. La distribución según una ley potencial correlaciona datos desde un canal de clasificación de tamaños de partículas al siguiente. Si se trazan en un gráfico de dos ejes en escala logarítmica (loglog), los datos producirán una línea recta; en forma similar, trazar datos en un gráfico de ejes x-y normal produce una línea exponencialmente decreciente.

Los estudios subsiguientes realizados con partículas han demostrado distribuciones para partículas del aire proporcionales a $1/(\text{diámetro})^{2.1}$. Las distribuciones de partículas de líquidos varían a partir de $1/(\text{diámetro})^2$ a $1/(\text{diámetro})^{4.5}$, si bien $1/(\text{diámetro})^3$ se emplea para la mayoría de las distribuciones de líquidos a temperatura ambiente.

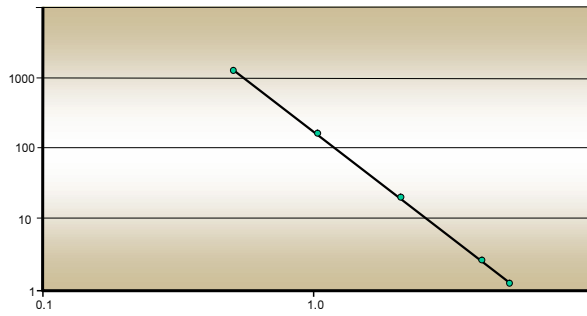


Gráfico 1: Partículas ambientales
(gráfica en escala logarítmica)

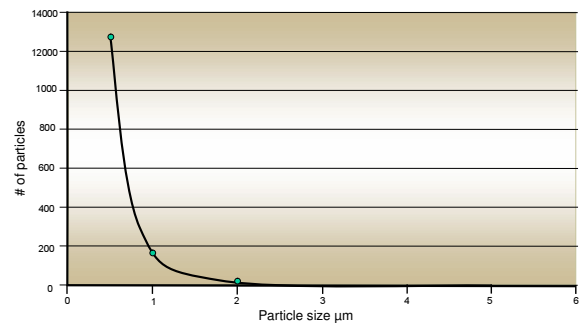


Gráfico 2: Partículas ambientales
(gráfica en ejes x-y)

Ejemplo de la fórmula de distribución según la ley potencial:

- La comprobación de agua potable muestra 20 partículas/ml > 2,0 μm
- Utilice la fórmula de distribución de partículas de líquidos $1/(\text{diámetro})^3$
- La fórmula puede calcular cuántas partículas son > 0,5 μm:
 - (número de partículas > 2 μm) * $[1/(\text{relación de diámetros de partículas})^3]$
 - $(20) * [1/(0,5 \mu\text{m}/2,0 \mu\text{m})^3]$
 - 1.280 partículas > 0,5 μm
- El agua potable contiene 20 partículas/ml > 2,0 μm y 1.280 partículas/ml > 0,5 μm.

Materiales

Casi cualquier cosa puede generar partículas conforme a las circunstancias correctas. En una sala blanca, los generadores de partículas más prolíficos son en general la gente. La gente genera partículas despidiendo células cutáneas, emitiendo perfume, colonias, aerosoles para el cabello, perdiendo pelo, respirando, estornudando, etc.

Todas las partículas se pueden clasificar de acuerdo a su agrupamiento:

- Partícula: una sola partícula con material similar de principio a fin.
- Agregado: grupo de partículas que se mantienen juntas mediante fuertes fuerzas atómicas o moleculares. Las fuerzas de atracción de las partículas son comparables con aquellas que sirven de ligante de un trozo de concreto.
- Aglomerado: grupo de partículas que se mantienen juntas mediante fuerzas de adhesión o cohesión más débiles. Las fuerzas de atracción de las partículas son comparables con aquellas que sirven de ligante en un terrón de tierra.
- Flóculo: grupo de partículas que se mantienen juntas mediante las fuerzas más débiles. Las fuerzas de atracción de las partículas son comparables con el polvo que se posa sobre una mesa.

Mecánica de las partículas

Las partículas exhiben ciertas tendencias. Se mueven por el aire y por otros medios mediante fuerzas balísticas o difusión. Las partículas pueden acumularse sobre superficies debido a la gravedad y la adherencia electrostática. En los líquidos, las partículas se pueden adherir a las burbujas de aire, pegarse a las paredes de un conducto o recipiente o aglutinarse en una masa más grande.

Importancia relativa de la gravedad versus otras fuerzas

Como toda materia, las partículas están influenciadas por la gravedad y otras fuerzas, entre las cuales se pueden incluir las fuerzas centrífugas o eléctricas. En la presencia de la gravedad y la ausencia de otras fuerzas, las partículas mayores que unos pocos micrones se posarán rápidamente sobre superficies o en las paredes de los tubos de muestra. Inversamente, las

partículas submicrónicas pueden quedar suspendidas en corrientes de aire durante un largo tiempo. Sin embargo, si las partículas son influenciadas por fuerzas centrífugas o eléctricas, es posible que éstas resistan a la gravedad, recorran distancias mayores o sean atraídas por ópticas. Un ejemplo sencillo de atracción de partículas a una óptica es una pantalla de televisión. El polvo (partículas) es atraído a la pantalla debido a fuerzas eléctricas de alta energía. La tendencia de las partículas a posarse sobre superficies se conoce como *coeficiente de estabilización* y, cuando se emplea junto con la ley de Stoke, los rendimientos de la estabilización se pueden demostrar de la siguiente manera:

Tamaño de las partículas (en μm)	Velocidad de estabilización (en cm/s)
0,0037	---
0,01	$6,95 \times 10^{-6}$
0,1	$8,65 \times 10^{-5}$
1,0	$3,5 \times 10^{-3}$
10,0	$3,06 \times 10^{-1}$
100,0	$2,62 \times 10^{-1}$

Tabla 2: Velocidad de estabilización

Movimiento

Fuerzas balísticas: Las partículas expulsadas de una herramienta o un proceso pueden hacer que éstas se muevan contra el flujo de aire predominante y no distribuirse en forma uniforme por el ambiente. Gradualmente, las partículas migrarán hacia áreas de presiones mas bajas, pero debido a la contribución continua de partículas por parte de la herramienta o el proceso, las distribuciones de partículas ambientales rara vez ocurren.

Difusión: Imagine volcar tinta roja en un cubo de agua limpia. Después de un rato, todo el cubo de agua se teñirá de un color rojo uniforme. Este fenómeno es la *difusión* y aún ocurre cuando un gas o un líquido parece estacionario. Las partículas suspendidas en un fluido (líquido o gaseoso) se mueven mediante varias fuerzas: corrientes, variación térmica y movimiento browniano.

Corrientes: Las corrientes son los movimientos laminares (suaves) o turbulentos (bruscos) de aire o de fluidos. Las corrientes son el resultado de diferencias de presión, con movimiento que se desplaza de un área de alta presión a un área de baja presión. Las partículas suspendidas en un flujo laminar tienden a permanecer en esa parte del fluido. En el aire, el movimiento lateral (de lado a lado) se llama *advección* y el movimiento vertical (hacia arriba y abajo) se llama *convección*.

Variación térmica (termoforesis): Las diferencias de temperatura en un fluido contribuyen a corrientes, en particular corrientes convectivas (verticales). Simplemente, la termoforesis describe el movimiento de partículas en una gradiente de temperatura a medida que éstas se desplazan desde una región caliente hacia una región más fría.

Movimiento browniano: Las partículas pequeñas suspendidas en gas o en líquidos entran en contacto con moléculas gaseosas. Esas moléculas chocan con partículas pequeñas y alteran la trayectoria de la partícula. La vía de la partícula, que ha sido alterada por las moléculas, se llama *movimiento browniano*. Cuando se calienta un líquido, las moléculas se tornan más energéticas, colisionando con mayor frecuencia y separándose cada vez más de otras moléculas y, de esa forma, aumentando el movimiento browniano.

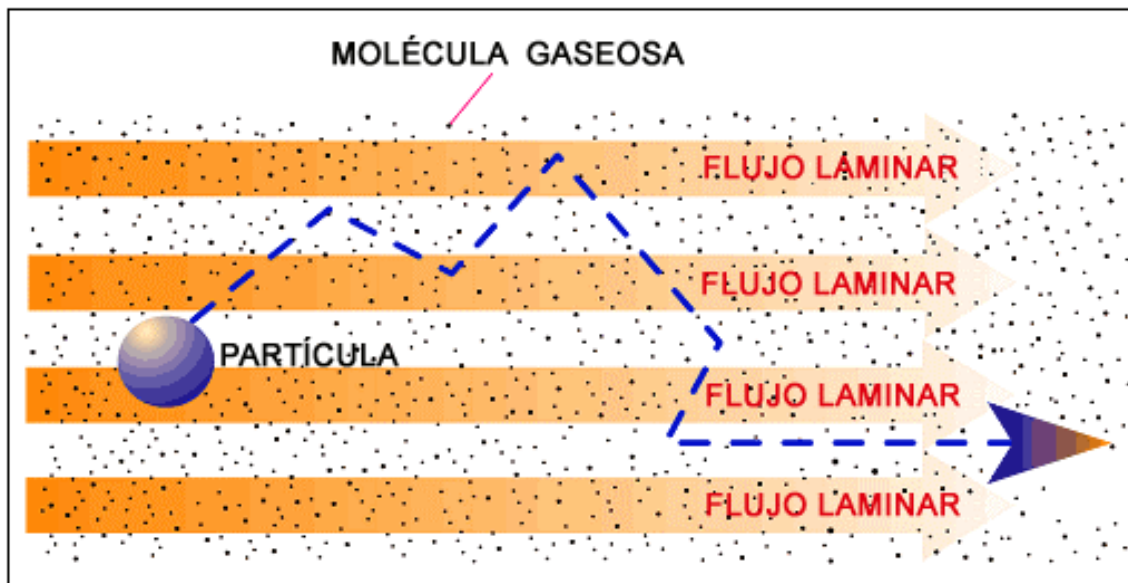


Figura 3: Movimiento browniano

Adherencia

Muchas fuerzas actúan sobre una partícula y la retiran de su estado libre (difuso). Las principales fuerzas de adherencia se describen a continuación.

Adherencia electrostática: Si se fricciona un globo contra el pelo se genera una capa de electricidad estática en el globo. Eso genera adherencia electrostática. En forma similar, las partículas pueden cargar electricidad estática la cual las hará atraer hacia superficies que tengan cargas opuestas.

Aglomeración: La aglomeración ocurre cuando las partículas se ligan unas a otras con firmeza. En los líquidos, las partículas tienden a aglomerarse en burbujas gaseosas.

Acreción: La acreción define el crecimiento de materia particulada a medida que las partículas se adhieren unas a otras. La adherencia electrostática u otras fuerzas “adhesivas” contribuyen a la acreción particulada y, bajo ciertas condiciones, dos partículas adheridas forman lo que se llama *doblete*.

Fricción: Las partículas se pueden adherir a una superficie áspera en la cual el movimiento o la fricción no sea lo suficientemente fuerte como para desplazarla.

Cuando se entienden estos principios de adherencia, los mecanismos principales de un filtro de atrapar partículas son de adherencia electrostática y fricción.

Ciclo de movimiento y adherencia

La difusión y adherencia coexisten en un ciclo continuo: las partículas circulan, quedan atrapadas, se liberan y recirculan. Este ciclo genera valores constantemente cambiantes para el número y el tamaño de las partículas. En consecuencia, los detectores de partículas analizan un volumen de fluido y pueden correlacionar los datos con las concentraciones de partículas por unidad de volumen.

Transporte de partículas a través de tubos

Como se mencionó anteriormente, el sistema de múltiples recoge partículas de áreas separadas y transporta las muestras a un contador de partículas situado en algún otro sitio. En general, un tubo o conducto permite la recogida de muestras a distancia, si bien cuando los medios de muestra dentro de un tubo recorren el trayecto desde un punto remoto a un contador de partículas, dos cosas ocurren:

- Algo de presión se pierde
- Algunas partículas se adhieren a los tubos

Algunos factores que contribuyen a la movilidad de las partículas dentro de los tubos deben ser entendidos. En la tabla 4 se describen las pérdidas de presión como una función de distancia, empleando una pauta sistémica de un caudal de aire de 3 pies cúbicos por minuto (CFM) por punto de muestra. A continuación se ofrecen breves descripciones de la terminología.

Diámetro (DI)	Número de Reynolds	Pérdida de presión (lb-pulg. ² /metro)	Velocidad del gas (m/segundo)
4 mm	9150	0,98	40,35
5 mm	7360	0,34	25,9
6 mm	6130	0,15	18,0
¼ pulg.	5780	0,11	16,0
7 mm	5250	0,07	13,2
8 mm (5/16 pulg.)	4585	0,04	10,1
9 mm	4070	0,02	8,0
3/8 pulg.	3865	0,016	7,2
10 mm	3670	0,013	6,5

Tabla 4: Pérdida de presión de aire en distancias

Diámetro interior: El diámetro interno de un *DI* designado para el tubo.

Número de Reynolds: La relación de fuerzas inerciales ($v_s\rho$) con las fuerzas viscosas (μ/L) que se emplean para determinar si el caudal será laminar o turbulento. El número de Reynolds responde a los flujos dentro de un tubo influenciados por la forma, la uniformidad interna, la verticalidad, la viscosidad fluida, la presión del aire ambiental y la temperatura.

Pérdida de presión: La presión del aire disminuye en forma proporcional a la longitud del tubo. Así, si 10 lb-pulg.² de presión de aire entran a un tubo de 20 metros de largo y 7 mm de ancho, la presión en el otro extremo medirá 8,6 lb-pulg.².

Velocidad del gas: La velocidad a la cual el gas se desplaza por el conducto.

Pérdida de partículas

Para reducir al mínimo la pérdida de partículas en los tubos, éstos deben siempre tener un tendido plano (si es posible) con curvaturas mínimas. Si se requiere la curvatura de los tubos, el radio de curvatura (que se mide en la curvatura interior) no debe ser menor a 6 pulgadas. Asimismo, el diámetro de los tubos y los materiales deben contribuir al transporte de partículas. La tubería con DI de 3/8 pulg. de polímero conductivo Bev-A-Line® se instala generalmente

para sistemas de múltiple aerosol y permite un transporte de partículas superior y a un costo razonable. Algunos materiales empleados en las tuberías no siempre están disponibles o son accesibles. Por lo tanto, a fin de reducir las pérdidas de partículas, se ofrece la siguiente lista en orden de preferencia:

1. Acero inoxidable
2. Polímero conductor
3. Poliéster
4. Vinilo (si no interfiere el plastificante)
5. Polietileno
6. Cobre
7. Cristal
8. Teflon
9. Aluminio

Parte II.

Entornos

En esta parte se describe el uso de entornos especializados y de filtrado para controlar los efectos de las partículas en la producción.

Entornos

Muchos procesos modernos de alta tecnología exigen limpieza. Específicamente, exigen una ausencia de contaminación particulada. Con unos pocos ejemplos se puede explicar mejor este concepto.

Ejemplo uno: En la industria de fabricación de semiconductores, en general nos referimos a éstos como “circuitos integrados” (CI), “microchips,” o “chips.” Un CI es un trozo plano de silicón grabado con líneas muy pequeñas (cables planos) que forman transistores y otros componentes. Los transistores pueden funcionar como un interruptor o como un amplificador de señales (voltaje, corriente o potencia).

Las líneas de los CI están tan juntas entre sí (0,09 μm de separación y contracción) que una partícula presente en una línea provocaría un cortocircuito. Los fabricantes de semiconductores necesitan filtrar las partículas del aire iguales o mayores que 0,09 μm ; las partículas menores que 0,09 μm no son lo suficientemente grandes como para causar un cortocircuito. Sin embargo, a medida que hay más líneas juntas, la exigencia de monitores más sensibles aumenta.

Los CI son dispositivos multicapa, siendo cada una de las capas extremadamente delgada; por lo tanto, a los fines de la fabricación, la superficie efectiva del CI es igual a lo siguiente:

$$\text{Superficie}(\text{Superficie CI}) = \text{largo} \times \text{ancho} \times \text{número de capas}$$

La densidad de las superficies de CI se combina con la posibilidad de que las partículas perdidas podrían destruir todo el chip. El control y la eliminación de la contaminación particulada dentro del entorno de producción es una de las principales preocupaciones del fabricante de semiconductores.

Ejemplo dos: La industria farmacéutica fabrica generalmente drogas *parenterales*. Las drogas parenterales (inyectables) deben estar libres de partículas que podrían infectar el cuerpo, tanto de seres humanos como de animales.

Las partículas que afectan negativamente el cuerpo tienden a ser mayores que 2 ó 3 μm y la empresa farmacéutica, al igual que el fabricante de semiconductores, debe manejar el entorno de producción para eliminar la contaminación particulada. Típicamente, las empresas farmacéuticas determinan la *limpieza del proceso* controlando la presencia de partículas de 0,5 μm y definen la *esterilidad del producto* monitoreando partículas de 5 μm . En contraste, la fabricación de semiconductores tiende a concentrarse en partículas de 0,3 μm hasta 0,05 μm .

Cómo controlar la contaminación particulada

Hay tres formas de controlar partículas:

- Eliminar las partículas existentes en el entorno de fabricación
- Prevenir o limitar la importación de nuevas partículas al entorno de fabricación
- Prevenir la generación de nuevas partículas dentro del proceso de fabricación

Filtrado

El filtrado es fundamental para controlar la contaminación particulada. Hay dos pasos para el filtrado: direccionar las partículas al filtro y atraparlas dentro de éste. El direccionamiento de las partículas al filtro es más difícil.

Este direccionamiento al filtro nos exige pensar las partículas en el contexto de una planta de fabricación característica. Una planta tiene una enorme cantidad de colectores de partículas (superficies donde las partículas se acumulan), superficies grandes y fuentes abundantes de contaminación. El método óptimo para la gestión de partículas protege el flujo laminar donde sea posible, así que tantas partículas como sea posible son barridas hacia los filtros. Desgraciadamente, no siempre es posible proteger el flujo laminar.

La captura de partículas en el filtro se basa en cuatro principios: cribado, impacto, fuerza electrostática y movimiento browniano. Los medios de filtrado tienen espacios intermedios o *poros* para permitir que el aire o el líquido pase (se tamice), mientras las fibras en el filtro capturan las partículas más grandes (impacto). Las fuerzas electrostáticas tienen la carga opuesta de las partículas que ayuda a atraparlas en una placa o fibra cargada. Sin embargo, algunas partículas más pequeñas pueden escurrirse por los poros pequeños y resistir el impacto, si bien su movimiento aleatorio (movimiento browniano) no les permite escapar del filtro. Todos estos principios se combinan para que el filtro sea más eficaz a medida que envejece.

Los filtros se tornan más eficaces a medida que las partículas gradualmente rellenan los espacios intermedios en los medios de filtrado, por lo tanto, habrá menos superficies disponibles para que las partículas escurran. No obstante, la mayor contaminación genera menos superficie para que el fluido pase a través, generando una mayor presión en el filtro y finalmente limitando gravemente la circulación a través del filtro. Una vez que el filtro alcanza su punto de saturación (totalmente lleno de partículas), se deberá reemplazar por uno nuevo. A veces, los medios de filtrado se pueden purgar (limpiar) y volver a usarse. En la figura 3 se muestra un medio de filtrado y la escala relativa de 25 μm .

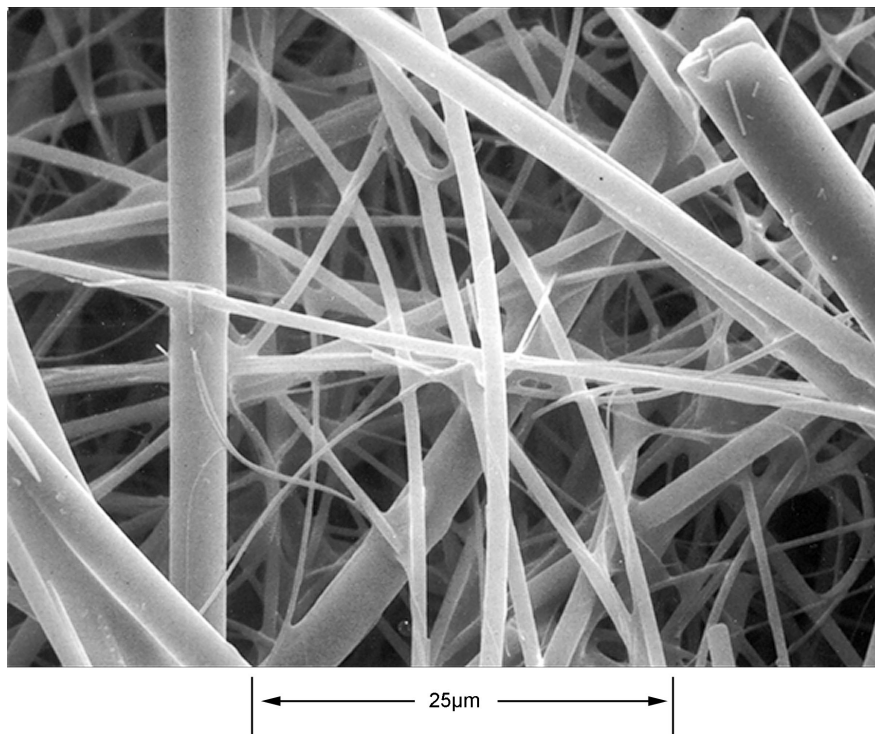


Figura 3: Medio de filtrado

Los medios de filtrado son cada vez más sofisticados y se fabrican de fibras sintéticas, membranas (Gore-Tex[®]), plásticos porosos o cerámicos. Las pautas de filtrado de aire regulares son las siguientes:

- El filtrado de aire particulado de alta eficiencia (*High Efficiency Particulate Air* o HEPA por sus siglas en inglés) es la norma industrial correspondiente a los entornos de fabricación ultralimpios y ultrapuros. Los filtros HEPA eliminan característicamente 99,99% de las partículas iguales o mayores que la especificación del filtro, que por lo general es de 0,3 μm . El filtrado HEPA es una parte integrada de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC).
- El filtrado de aire de penetración ultrabaja (*Ultra Efficiency Particulate Air* o ULPA por sus siglas en inglés) elimina el 99,9997% de partículas iguales o mayores que 0,12 μm . Los entornos de procesos ultralimpios requieren filtros ULPA.

En el pasado, los estudios de la contaminación particulada exigían el uso de un microscopio para contar y medir las partículas en el filtro. Esta técnica desperdiciaba tiempo, requería de mano de obra intensiva y no proporcionaba monitoreo de partículas en tiempo real. Hoy, la sofisticada instrumentación empleada en el conteo de partículas realiza el análisis de los filtros.

Salas blancas

Los entornos de procesos “limpios” deben seguir siendo infaliblemente limpios y entonces el filtrado del aire de la fábrica es inadecuado. Para reducir al mínimo la contaminación particulada es importante crear entornos separados, conocidos como *sala blanca*. Esto permite que los límites a las partículas se mantengan en niveles que se puedan medir y controlar. Las salas blancas consiguen esos excelentes niveles de limpieza maximizando el flujo de aire laminar y reduciendo al mínimo los colectores de partículas. El flujo de aire laminar es aire que se desplaza en una sola dirección, con lo cual las partículas pueden ser barridas lejos de una superficie. Los colectores de partículas son superficies donde las partículas se juntan y escapan al flujo de aire laminar. Los diseños cuidados de salas blancas pueden reducir al mínimo esas superficies.

En las salas blancas eficaces, los filtros instalados en el techo permiten que el aire filtrado pase desde arriba hacia el suelo. Las baldosas tienen orificios pequeños que permiten que el aire pase por debajo del suelo, donde los retornos de aire (conductos de aire) transportan el aire de nuevo a los filtros en el techo. Este proceso de filtrado puede intercambiar el volumen de aire total de la sala blanca más que treinta veces por hora, dando por resultado el entorno más limpio posible al tiempo que reduce al mínimo el movimiento advectivo de partículas.

La reducción adicional de la contaminación en una sala blanca requiere personal vestido con ropa de protección, cofias para cabello y barba, capuchas, galochas y guantes. Estos elementos de protección se los conoce familiarmente como *trajes de conejo*. En los entornos más limpios, el personal lleva puesto trajes de conejo equipados con cascos y respiradores que filtran el aire que se exhala. La indumentaria de sala blanca es extremadamente importante en el control de la microcontaminación para poder contener las partículas que emiten las personas.

Minientornos y aisladores

Las salas blancas tecnológicamente más avanzadas emplean minientornos. Se trata de salas blancas en miniatura (que miden pocos metros de largo) y que aíslan el producto de las fuentes de contaminación externas. Los minientornos comprenden ventiladores de aire propios, filtros, controles de temperatura y humedad, brazos robóticos internos o guantes de goma integrados. Debido a su tamaño, los minientornos son significativamente menos costosos que las salas blancas y su uso es cada vez más extendido. Una fábrica puede instalar minientornos en una sala blanca de grado inferior, en lugar de invertir grandes cantidades de dinero en la construcción de una planta de alta tecnología, y conseguir los mismos resultados.

Clasificación de salas blancas y minientornos

La norma federal de EE.UU. 209E, publicada en 1963, definió la clasificación y el monitoreo de salas blancas dentro de los Estados Unidos. El Comité europeo de normalización, junto con la Organización internacional de normalización (ISO), elaboraron pautas para Europa. Las diferentes normas provocaron confusión, así que en 1992, el Instituto nacional de normalización de Estados Unidos (ANSI) y el Instituto de ciencia y tecnología ambiental (IEST) presentaron una solicitud a ISO para desarrollar una norma internacional. ISO elaboró pautas nuevas para las clasificaciones y el monitoreo de salas blancas, y las publicó conforme a la ISO 14644. En noviembre de 2001, los Estados Unidos adoptaron las normas ISO 14644 y oficialmente derogaron la norma FS-209E. En la tabla 2 se comparan las clasificaciones de sala blanca correspondientes a la FS-209E e ISO 14644-1.

Clasificaciones de sala blanca	
FS-209E	ISO 14644-1
(partículas por pie cúbico)	
—	1
—	2
1	3
10	4
100	5
1000	6
10000	7
100000	8
—	9

Tabla 2: FS209E e ISO

La ISO 14644-1 establece las clases normales de limpieza del aire para salas blancas y zonas limpias conforme a concentraciones específicas de particulados del aire. Una sala blanca *ISO Clase 1* no tiene más que 10 partículas mayores que 0,1 μm en cualquier metro cúbico de aire dado. Una sala blanca *ISO Clase 2* estaría diez veces más sucia que una sala blanca Clase 1 y una sala blanca *ISO Clase 3* estaría diez veces más sucia que una de Clase 2, y así sucesivamente. Los límites específicos permitidos por clase ISO aparecen en la tabla 3.

CLASS	Number of Particles per Cubic Meter by Micrometer Size					
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	1.0 μm	5.0 μm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1,000	237	102	35	8	
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83	
ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
ISO 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO 7				352,000	83,200	2,930
ISO 8				3,520,000	832,000	29,300
ISO 9				35,200,000	8,320,000	293,000

Tabla 3: Clasificaciones ISO de salas blancas

Normativa para salas blancas

En 1984, el Instituto de ciencia y tecnología ambiental elaboró el anteproyecto de la IES-RP-CC-006-84-T, que es un método para la comprobación de salas blancas. Las técnicas de medición dentro de los parámetros de prueba comprenden lo siguiente:

- velocidad y uniformidad del flujo de aire
- integridad del filtro
- paralelismo del flujo de aire
- tiempo de recuperación de sala blanca
- conteo de partículas del aire
- tasa de precipitación radiactiva de las partículas
- presión y contaminantes de sala blanca
- tasa de inducción
- niveles de luz y ruido
- temperatura y humedad relativa
- vibración

El Departamento nacional de equilibrio ambiental (NEBB) amplía esta norma y ofrece un programa de certificación a cargo de terceros. Mientras que el programa de certificación del NEBB ofrece información útil, no se requiere el NEBB para la certificación de sala blanca.

Evaluación y certificación de salas blancas

La certificación de salas blancas ocurre después de la construcción o de haberse realizado cambios físicos significativos. La certificación garantiza que la instalación cumpla con los requisitos correspondientes a una concentración máxima estadísticamente válida de partículas del aire de tamaño determinado. Las certificaciones de sala blanca pueden ocurrir en cualquiera de estas tres diferentes etapas:

As Built: Una sala blanca certificada como "Instalación ISO Clase X, As Built" define una sala blanca totalmente construida y operativa, con todos los servicios conectados y funcionando, pero que no tiene equipo de producción ni personal operativo en la instalación. Esta certificación es la más común puesto que los diseñadores y constructores de la sala blanca pueden atender cualquier falla de inmediato y corregirla.

At Rest: Una sala blanca certificada como "Instalación ISO Clase X, At Rest" define una sala blanca totalmente construida y operativa, con los equipos de producción instalados y funcionando (o que pueden funcionar), pero que no tiene personal en la instalación. Esta certificación demuestra el cumplimiento continuado a partir de la certificación "As Built." Las salas blancas que fueron construidas pero permanecen vacías o aquellas que fueron modificadas requerirían de la certificación "At Rest."

Operativa: Una sala blanca certificada como "Instalación ISO Clase X operativa" define una sala blanca en operaciones de fabricación normales, que incluyen tanto equipamiento como personal. Esta certificación puede ocurrir después de que se instale un complemento parcial o total del equipo dentro de la sala blanca. La intención es para demostrar el cumplimiento continuado de sala blanca y mantener las normas de limpieza. El personal a cargo de la gestión de la sala blanca determinará si la sala blanca debe cumplir certificaciones "operativas" y, en caso afirmativo, cuándo.

Partículas depositadas

Las certificaciones de sala blanca no requieren la evaluación de la deposición de partículas en superficies; las certificaciones de sala blanca sólo evalúan las partículas que libremente se mueven en el aire. Sin embargo, las partículas depositadas pueden causar el impacto más grande en los procesos de fabricación de alta tecnología.

A fin de evaluar la deposición de partículas, una instalación puede recoger partículas depositadas en un *plato testigo*. Un plato testigo es un objeto plano sin partículas hecho de los mismos materiales que el producto que se está fabricando (por ejemplo: si se fabrican productos de plástico ABS, se deben emplear platos testigo de plástico ABS).

Se colocan varios platos testigo en toda la sala blanca y éstos se dejan para recoger la deposición de partículas. Después de un período determinado, el personal a cargo de la comprobación recoge los platos testigo y cuenta las partículas depositadas. El conteo de las partículas de los platos testigo requiere en general un microscopio óptico o contadores de partículas con análisis de superficie.

Actualmente, hay sensores de deposición molecular que pueden monitorear eficazmente los índices de deposición de partículas. Esos sensores, como los platos testigo, emplean un material de contenido similar al producto de la planta de producción. El material se recubre sobre una onda acústica de superficie (OAS) que ejerce la misma atracción de partículas que el producto. Los sensores de deposición molecular pueden ayudar a reducir o eliminar la comprobación mediante platos testigo, con lo cual se ahorrará dinero.

Parte III.

Detección de partículas

En esta parte se describe la tecnología de los contadores de partículas y los métodos más comunes de detección, conteo y medición de partículas.

DetECCIÓN DE PARTÍCULAS

La certificación de sala blanca es un proceso en trámite. El monitoreo continuado de la calidad del aire garantiza que el sistema de filtrado funciona correctamente y que no existen generadores de partículas desconocidas.

En los primeros años de los procesos de fabricación limpia, los filtros de prueba capturaban partículas. Más tarde, el personal de laboratorio utilizó microscopios para confirmar la cantidad y el tamaño de las partículas capturadas. A veces, la persona que contaba las partículas podía determinar la composición de las mismas (por ejemplo, polvo cúprico). Dejando de lado el esfuerzo que desperdicia tiempo, el microscopio es aún la mejor forma de conocer información específica sobre las partículas, pero no ofrece datos instantáneos relativos a la contaminación. El microscopio revela eventos de partículas *históricos* y no *actuales*.

A mediados de los cincuenta, las aplicaciones en el área militar engendraron el desarrollo de los primeros instrumentos para el conteo de partículas. Esos dispositivos hicieron posible monitorear niveles de partículas instantáneos y proporcionar notificaciones rápidas cuando los niveles de contaminación excedían los límites. En lugar de esperar días para el análisis de partículas, lo cual podía permitir que miles de productos defectuosos pasaran a través de un proceso, el contador de partículas proporcionó datos en minutos.

Gradualmente, esta tecnología se extendió a otros sectores de la fabricación y creció la confianza en la nueva tecnología de conteo de partículas. Los ingenieros de proceso que monitoreaban los niveles de contaminación de partículas en tiempo real empezaron a desarrollar procesos que fueron más eficaces, con menos productos dañados.

Hoy, el contador de partículas mejora continuamente la productividad proporcionando niveles, tendencias y fuentes de contaminación particulada en detalle. El personal de fabricación utiliza los datos de partículas para entender las causas de la contaminación, programar con precisión los ciclos de mantenimiento de salas blancas, correlacionar los niveles de contaminación con los procesos de fabricación y ajustar cada paso de la producción.

CONTADORES DE PARTÍCULAS ÓPTICOS

La mayoría de la gente reconoce a simple vista el polvo que se mueve trémulamente en un rayo de sol. Cuatro son los principios necesarios para ver el polvo: luz solar (ilumina el polvo), polvo (refleja la luz solar), aire (transporta el polvo) y el ojo humano (ve el polvo o, más precisamente, ve la luz reflejada por el polvo). Un contador de partículas óptico (OPC) utiliza los mismos principios pero maximiza la eficacia. Los contadores de partículas utilizan una fuente de luz de alta intensidad (un *láser*), un flujo de aire controlado (*volumen de visualización*) y detectores de acumulación de luz altamente sensibles (un *fotodetector*).

TEORÍA DEL FUNCIONAMIENTO

Los contadores de partículas con láser ópticos emplean cinco sistemas principales:

1. *Rayos láser y ópticas*: Un láser es la fuente de luz preferida puesto que la luz es una única longitud de onda, lo cual significa sólo un “color” de luz de alta intensidad. Los rayos láser comunes se ven rojos, verdes o casi infrarrojos. Los primeros rayos láser fueron varillas de rubí. Estas varillas fueron reemplazadas por tubos de cristal rellenos con un gas o una mezcla de gases. Los rayos láser de helio-neón (HeNe) se emplearon generalmente en contadores de partículas, si bien poco a poco fueron sustituidos por diodos láser de estado sólido. Actualmente, los diodos láser son los más comunes puesto

que ofrecen potencia disponible, tamaño más pequeño, peso más ligero, costo más bajo y duración media entre fallas más prolongada.

Las ópticas coliman y enfocan la luz del láser de modo tal que éste ilumina la región de muestra de partículas, que se llama *volumen de visualización*. Las ópticas adicionales recogen luz dispersa y la transmiten a un *fotodetector*.

2. *Volumen de visualización*: El volumen de visualización es una cámara pequeña iluminada por el láser. El medio de muestra (aire, líquido o gas) es atraído al volumen de visualización, el láser atraviesa el medio, las partículas dispersan (reflejan) luz, y un fotodetector aglomera las fuentes de luz dispersas (las partículas).
3. *Fotodetector*: El fotodetector es un dispositivo eléctrico que es sensible a la luz. Cuando las partículas dispersan luz, el fotodetector identifica el destello de luz y lo convierte a una señal eléctrica o *pulso*. Las partículas pequeñas dispersan pulsos de luz pequeños y las partículas grandes dispersan pulsos de luz grandes. Un amplificador convierte los pulsos a un voltaje de control proporcional.
4. *Analizador de altura de pulso*: Los pulsos del fotodetector se envían a un analizador de altura de pulso. El analizador de altura de pulso examina la magnitud del pulso y coloca su valor en un canal de clasificación por tamaño apropiado, llamado *depósito*. Los depósitos contienen datos sobre cada pulso y esos datos se correlacionan con los tamaños de las partículas.
5. *Caja negra*: La caja negra o conjunto de circuitos de soporte mira el número de pulsos de cada depósito y convierte la información a datos de partículas. A menudo, los computadores muestran los datos y los analizan.

Comentarios relativos a los contadores de partículas con láser

1. Los contadores de partículas no cuentan partículas

Los contadores de partículas cuentan los pulsos de luz dispersada a partir de las partículas o, en algunos casos, cuentan las sombras que proyectan las partículas iluminadas a contraluz. La cantidad de luz que una partícula dispersa o eclipsa puede variar con varios factores distintos, entre los que se incluyen los siguientes:

- La forma de la partícula:
 - Las partículas rara vez son lisas y esféricas como las partículas de PSL empleadas en las calibraciones de los contadores de partículas. Con frecuencia, las partículas son escamas de piel o fibras aserradas. Cuando éstas flotan lateralmente a través del volumen de visualización, dispersan una cantidad de luz diferente que si hicieran el recorrido a lo largo.
- El albedo (potencia reflectora) de la partícula:
 - Algunas partículas son más reflectoras (por ejemplo, el aluminio) que otras, lo cual produce más luz dispersa en el fotodetector. El fotodetector produce un pulso más grande y el contador de partículas cree que la partícula es más grande que su tamaño verdadero. Por el contrario, algunas partículas son menos reflectoras (por ejemplo, el carbono) y el contador de partículas cree que una partícula más pequeña pasó por el volumen de visualización.

2. Los contadores de partículas no cuentan todas las partículas contenidas en un volumen

Por ejemplo, en una sala blanca de 5.000 pies² con techos de 12 pies de altura, un contador de partículas de 1 pie cúbico por minuto (CFM) analizará sólo 1/60.000 (ó 0,0000167%) del aire interior total en un minuto. En una hora, el contador de partículas contará sesenta veces más aire, lo cual equivale a sólo el 0,001% del volumen de toda la sala. Considerando que sólo se extrae una muestra de volumen pequeño, los contadores de partículas deberían extraer suficientes muestras de los medios (aire, líquido o gases) para representar estadísticamente todo el volumen. Esto se llama *incidencia estadística* y es una representación válida del volumen total. ISO proporciona una fórmula específica, basada en volúmenes de muestras, para determinar cuándo una muestra cumple con la incidencia estadística.

Las técnicas de muestreo parecen sencillas, pero las partículas jamás se propagan verdaderamente (distribuyen homogéneamente) dentro de un volumen de muestra. Las partículas tienden a permanecer en el flujo laminar, acumularse en el flujo turbulento, adherirse a las superficies y elevarse en aire caliente. Si bien las salas blancas reducen al mínimo estos colectores de partículas y sus problemas, siempre habrá zonas donde las partículas se junten.

Tipos de contadores de partículas

Hay distintas variedades de contadores de partículas. Las diferencias principales dependen del medio en el cual las partículas quedan suspendidas: aire, líquido, gas, vacío o un medio atmosférico/meteorológico.

Llevadas por el aire: Los contadores de partículas del aire miden la contaminación en salas blancas con filtros HEPA, ensamblajes de unidades de disco, fabricantes de medicamentos, pequeños bancos de prueba, instalaciones para lanzamiento de cohetes y cientos de aplicaciones diferentes de aire controlado.

Líquidos: Los contadores de partículas de líquidos miden la contaminación en todo, incluida el agua potable, las drogas inyectables, los fluidos de transmisión y los ácidos fluorhídricos. Algunos contadores de partículas de líquidos requieren un accesorio llamado *muestreador*. El muestreador se comunica con el contador de partículas, extrae automáticamente un volumen preciso de líquido y, programado con la velocidad específica de entrega del contador, distribuye el líquido al contador de partículas. Algunos contadores de líquido se conectan directamente a conductos de instalaciones sanitarias o utilizan gases presurizados para eliminar burbujas en sustancias químicas.

Gas: Los contadores de partículas en gases miden la contaminación suspendida en los gases. Estos gases pueden ser ya sea inertes o volátiles y ser secos (anhídridos) o contener vapores de agua. En general, el diseño del contador de partículas de gases proporciona mediciones de contaminación a presiones que varían de 40 a 150 psig.

Vacío: Los contadores de partículas de vacío llenan un mercado altamente especializado donde ocurren procesos a presiones negativas (vacío), hecho que lo convierte en un desafío. Las partículas no muestran un movimiento predecible en el vacío, así que los contadores de partículas especializados deben depender del dinamismo de la partícula para su detección.

Medio atmosférico/meteorológico: Una de las aplicaciones originales de los contadores de partículas, los contadores de partículas atmosféricos o meteorológicos analizan la contaminación atmosférica como la polución o proporcionan estudios climáticos en detalle. Estos

instrumentos miden las gotas de agua, los cristales de hielo, los núcleos de condensación o la propagación de la contaminación desde incendios de petróleo y erupciones volcánicas.

Variaciones de las tecnologías de los contadores de partículas

Cuando se diseña un contador de partículas se pueden emplear diversas variaciones tecnológicas. La aplicación dicta la variante tecnológica empleada en el contador de partículas. Asimismo, los rayos láser escogidos para las versiones tecnológicas se seleccionan para alcanzar eficiencia en la clasificación por tamaño de las partículas.

La intensidad de un láser no es uniforme. Específicamente, un láser es más intenso en el centro que en los bordes. La intensidad del láser ilustra una distribución gaussiana o en forma de campana. Algunos contadores de partículas emplean máscaras ópticas especiales para que se muestre solamente la parte central del láser. En la figura 4 se muestra el haz de un láser verdadero proyectado sobre una cuadrícula. Los niveles de intensidad del láser aumentan hasta un punto máximo (las zonas blancas y rojas), que es el centro del haz del láser.

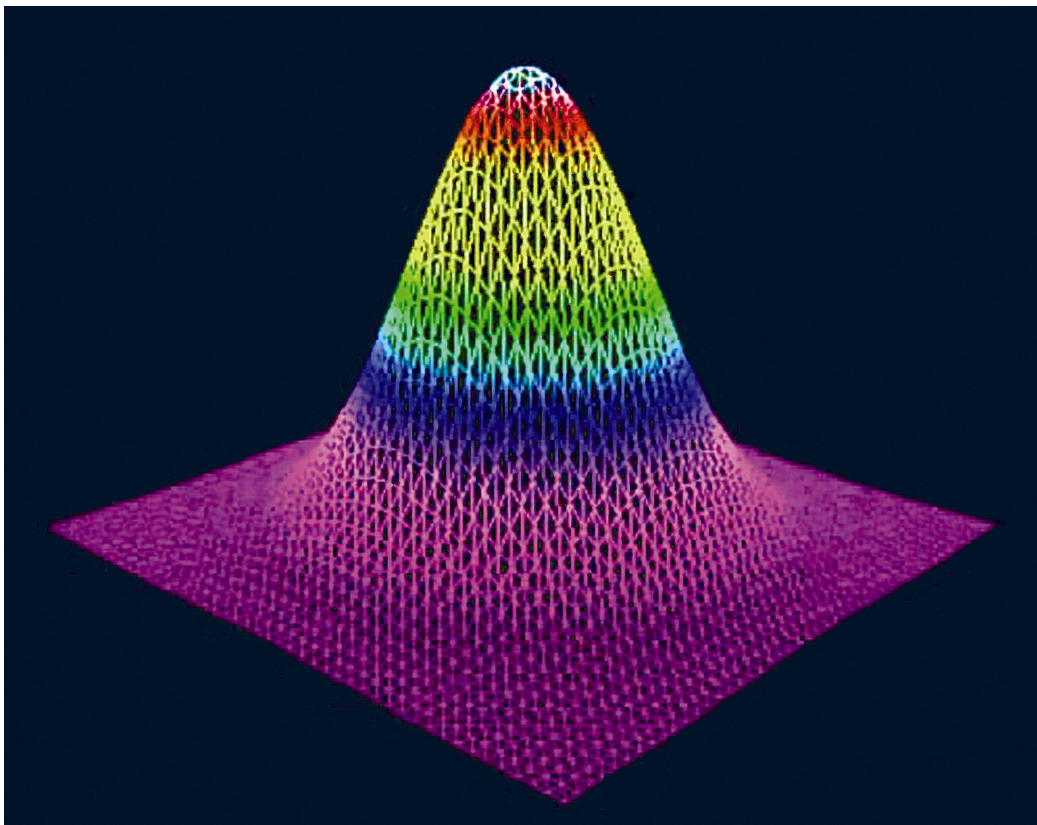


Figura 4: Perfil de un láser (cortesía de CrystaLaser)

Dispersión versus extinción

Tanto la tecnología de dispersión como la de extinción emplea un láser para iluminar la zona de visualización. Los contadores de partículas por dispersión miden la luz reflejada (dispersada) de una partícula cuando ésta pasa a través de la región de visualización. Los contadores de partículas por extinción iluminan todo el volumen de visualización y miden la sombra de la partícula (zonas donde la luz se extingue) cuando ésta pasa a través de la región de visualización. La tecnología de extinción sólo se emplea en contadores de partículas de líquidos que clasifican partículas de tamaños mayores que $2\ \mu\text{m}$. Si la tecnología de dispersión se empleara para partículas grandes, el fotodetector quedaría cegado por la intensa luz dispersada.

Volumétrico versus no volumétrico

Los contadores de partículas volumétricos analizan todo el volumen de muestra de partículas. Los contadores de partículas no volumétricos examinan sólo una pequeña parte representativa de todo el volumen de muestra. Típicamente, los contadores de partículas no volumétricos tienen caudales mayores que permiten extraer mayor volumen total de muestra; por el contrario, sacrifican algo de diferenciación en los canales de clasificación por tamaño de partícula, que se conoce como *resolución*. En general, los contadores de partículas volumétricos toman muestras de líquidos más lentamente, si bien proporcionan muchos canales de clasificación de tamaño de partículas y mejor resolución.

Espectrómetro versus monitor

Como se mencionó anteriormente, la intensidad del haz del láser no es uniforme en todo el perfil del mismo. Los espectrómetros emplean sólo el centro del haz del láser y los monitores emplean la anchura total del haz del láser.

Los espectrómetros emplean la parte central del haz de láser puesto que la intensidad del láser es constante. Las fuentes de luz más constantes proporcionan mayor precisión en la detección de partículas, así que un espectrómetro puede discernir con más facilidad ligeras diferencias en los tamaños de las partículas y ofrecer una mejor resolución.

Los monitores emplean todo el haz del láser y por lo tanto no pueden percibir las pequeñas diferencias entre los tamaños de partículas. Tal como se ilustra en la figura 5, una partícula que pasa a través del borde del haz del láser estará sometida a una luz de intensidad menor que la misma partícula pasando a través del centro del haz del láser. Las amplitudes de pulso relativas, que aparecen en el diagrama a continuación, ilustran el pulso de una partícula y el piso de ruido (ruido eléctrico de fondo). Como se muestra, la misma partícula generará distintas amplitudes de pulso según dónde entra el haz del láser. En forma similar, una partícula más grande que pase por el borde del haz puede proporcionar la misma amplitud de pulso que una partícula pequeña que atraviesa el centro del haz. En consecuencia, los monitores incluyen sólo unos pocos canales de clasificación por tamaño, con suficiente distancia entre uno y otro, para justificar este error en los tamaños.

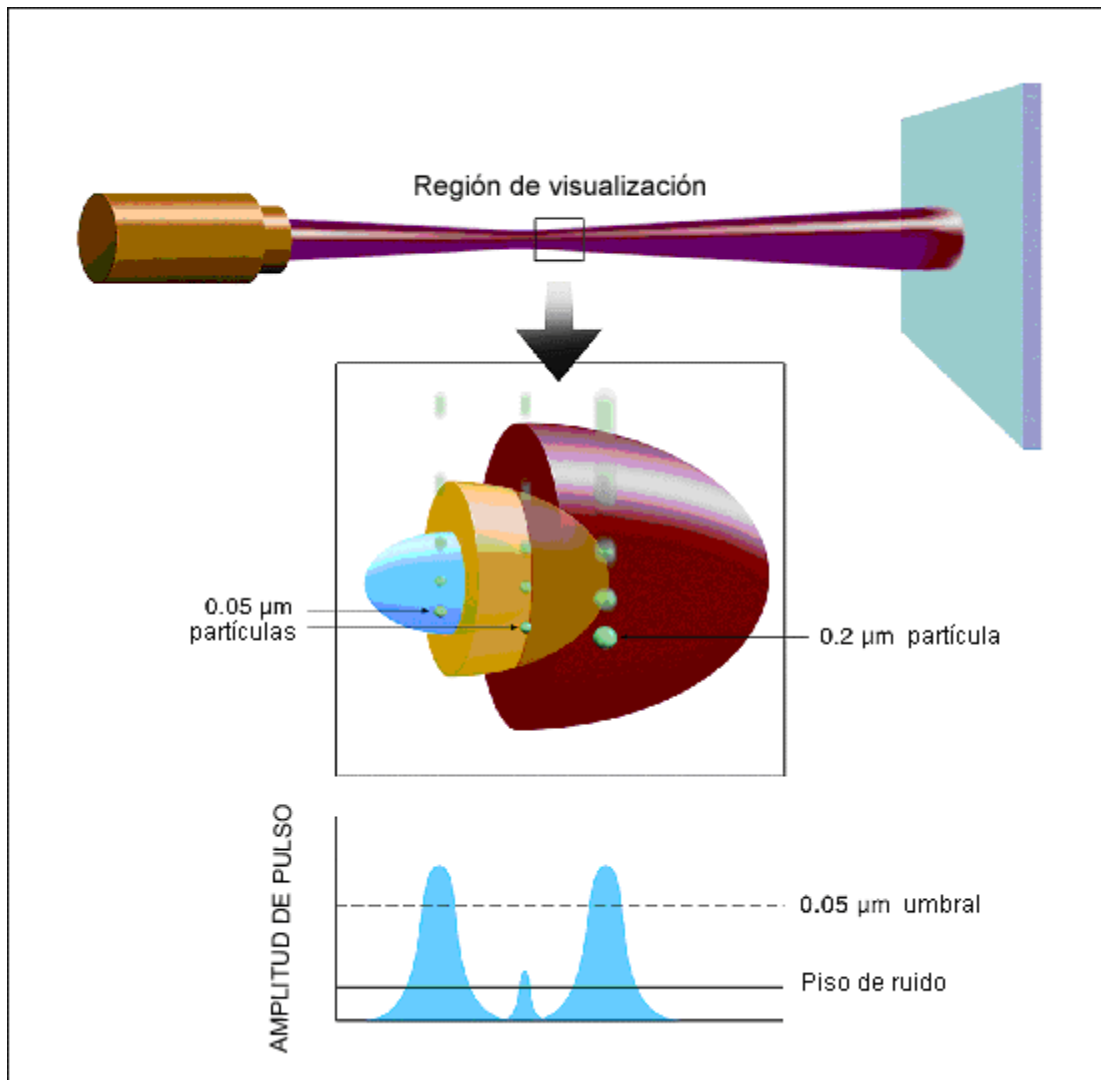


Figura 5: Intensidad del láser y errores en la clasificación por tamaño

Cómo escoger entre espectrómetros y monitores:

Ante una intensidad de luz específica dada, las partículas pequeñas dispersan una pequeña (débil) cantidad de luz y las partículas grandes dispersan una gran (brillante) cantidad de luz.

En un diseño perfecto, una partícula que pase a través de un haz de láser emitirá primero un destello débil de luz a medida que ésta entra al haz, iluminándose lentamente mientras llega al centro del haz y atenuándose cada vez cuando la partícula sale del haz. En el mundo real, como la partícula no tiene una inclinación hacia el centro del haz, es casi seguro que transite el borde del mismo, lo cual dará por resultado un destello débil.

A menos que la parte “visualizada” del láser (la parte visible para el fotodetector) se limite al centro del haz, es imposible que el analizador de altura de pulso determine si el destello débil fue producto de una partícula pequeña transitando el centro del haz o de una partícula grande transitando el borde del haz. De esa forma, la capacidad del contador de partículas para medir con precisión los tamaños de las partículas se ve limitada por la tecnología empleada.

Los espectrómetros emplean técnicas de enfoque o enmascaramiento para limitar la región de visualización a la parte central del haz del láser. Además, requieren volúmenes de muestra más pequeños y tasas de caudal menores puesto que es más fácil determinar el tamaño de la partícula si ésta pasa lentamente a través del haz del láser. Esta tecnología proporciona datos de

clasificación de tamaño de partícula específicos. La precisión en la clasificación del tamaño exacto de la partícula con el espectrómetro lo transforma en un instrumento preferido para realizar estudios de filtrado, analizar temas determinados de la contaminación particulada, ilustrar los desafíos presentados por las partículas monodispersas y verificar las exactitudes de los contadores de partículas menos precisos.

Hay muchas aplicaciones donde la clasificación por tamaño precisa de partículas específicas no tienen ninguna consecuencia. Esas aplicaciones sólo requieren información general sobre partículas, siendo de esta forma apropiado un monitor de partículas. Además, considerando cualquier sensibilidad a un tamaño de partícula dado, un monitor extrae muestras de volumen mayor a mayor caudal, lo cual proporciona más datos sobre partículas. Por ejemplo, los monitores son los instrumentos preferidos para el monitoreo multipunto de un sistema de agua desionizada (DI) o el sistema de tuberías integrado de una fábrica.

Contadores de partículas por condensación

Todas las técnicas de conteo de partículas automatizado están limitadas por el tamaño de las partículas más pequeñas que pueden detectar. Esto es, llegamos a un punto en el cual la partícula es tan pequeña, que la luz dispersada no se puede distinguir del ruido de fondo. El ruido de fondo es similar a la estática eléctrica y es un subproducto de las operaciones eléctricas. Cuando una partícula es demasiado pequeña para distinguirse del ruido de fondo, hay contadores de partículas especiales que agrandan las partículas a tamaños mayores, con lo cual se posibilita la detección. Esos contadores de partículas se llaman contadores de partículas por condensación (CPC).

Los CPC contienen un depósito de líquido volátil, como el alcohol butílico. El aire de muestra circula a través de una cámara cálida donde los vapores del alcohol se mezclan con el mismo. A continuación, el aire de muestra y los vapores de alcohol circulan por una cámara de condensación fría, donde los vapores se supersaturan y condensan sobre las partículas. Cuando se emplea esta técnica, gotas microscópicas de alcohol pueden rodear partículas tan pequeñas como $0,01 \mu\text{m}$ y aumentar las gotas de partículas/alcohol midiendo un tamaño de 1 a $2 \mu\text{m}$. Este tamaño de partícula es fácilmente detectable.

El diseño de los CPC propagan todo el exceso de alcohol a las paredes de la cámara de condensación de modo que las gotas se sumen a los totales de partículas. Similar a los contadores de partículas ópticos, los contadores de partículas por condensación con diámetros de partículas detectables menores son más complejos y requieren más mantenimiento.

El contador de partículas por condensación tiene algunas desventajas respecto del contador de partículas óptico: los CPC requieren la carga periódica de los depósitos de alcohol, el alcohol butílico tiene un olor desagradable, los CPC con alcohol no butílico emplean líquidos de fluorocarbono y, si se produce un derrame accidental del CPC, no habrá salida de datos hasta que las piezas anegadas vuelvan a su condición normal. En muchos entornos (ISO Clase 6 o más sucios), un CPC detectaría tantas partículas que no podría contar lo suficientemente rápido y así los datos resultantes serían erróneos. Asimismo, a diferencia de un OPC, un CPC no puede ofrecer información sobre el tamaño de las partículas. Como un CPC aumenta el tamaño de todas las partículas al mismo diámetro, sólo puede informar sobre la presencia de una partícula pero no sobre su tamaño.

USO DE LOS CONTADORES DE PARTÍCULAS

A fin de emplear efectivamente un contador de partículas, éste se debe manipular, instalar y accionar correctamente. A continuación se ofrecen algunas pautas para garantizar que el instrumento funcione correctamente y tome muestras estadísticamente válidas.

Los contadores de partículas no son como otros equipos de prueba comunes. Entre éstos se incluyen rayos láser, ópticas especializadas, tarjetas de circuitos impresos (PCB) y regiones de muestreo minuciosamente alineadas. Son extremadamente sensibles a las tensiones ambientales como las vibraciones, la interferencia electromagnética (EMI), el calor y el frío extremos, y la suciedad. Los contadores de partículas son instrumentos electrónicos sensibles de alto rendimiento.

Pautas para el manejo de los contadores de partículas

Primero, lea siempre el manual del contador de partículas. El manual ofrece las mejores sugerencias para el funcionamiento del contador de partículas; la falta de información sobre los procedimientos de instalación apropiados podría ser costosa en tiempo y dinero.

Desembalaje

Muchos contadores de partículas se fabrican y embalan dentro de entornos similares a salas blancas. No retire la bolsa de plástico que recubre el contador de partículas hasta que el instrumento esté en el entorno donde será empleado. Esto es especialmente cierto si el contador de partículas va a funcionar en una sala blanca. Si se observa esta pauta, reducirá al mínimo la exposición del contador de partículas a la tierra y la humedad que contaminan las superficies ópticas.

Instalación

El área de instalación debe estar libre de vibraciones provenientes de otros equipos y a temperatura ambiente normal (70°F/21°C). Coloque el contador de partículas sobre una superficie limpia y nivelada, cerca de una fuente de alimentación eléctrica con conexión a tierra y CA condicionada. Evite colocar el instrumento en un entorno eléctricamente ruidoso (con muchos picos de voltaje de motores eléctricos, relés, transformadores, etc.). El ruido eléctrico puede causar conteos de partículas falsos.

Almacenamiento

Si corresponde, vacíe toda sustancia química corrosiva (en contadores de partículas de líquidos) y reemplácelas por fluido para limpiaparabrisas anticongelante. Envuelva el contador de partículas en una bolsa de plástico (antes de retirarlo del entorno limpio), selle y etiquete la bolsa. En la etiqueta debe indicarse el tipo de contador de partículas, la fecha, la razón de almacenamiento, el número de serie y la fecha de vencimiento para realizar la calibración. Luego, cuando se lo vuelva a necesitar, el contador de partículas estará preparado para volver a la instalación de calibración/repación.

Archivo del instrumento

Debería considerar guardar un archivo que muestre la fecha en que el instrumento fue puesto en servicio, cuándo vence la calibración, la cantidad de tiempo que se utilizó, la fecha de todo mantenimiento preventivo realizado (limpieza de ópticas, etc.), todo accidente o daño y cualquier prestación fuera de lo común observada por los operadores.

Mantenimiento

Los contadores de partículas necesitan mantenimiento de rutina que típicamente incluye la limpieza de las superficies ópticas. Con el tiempo, estas superficies acumulan tierra que puede dispersar la luz del láser; en los contadores de partículas de líquidos, esto se llama *luz de CC*. La luz de CC es una medición de la corriente continua (CC) relacionada con la cantidad de luz de láser dispersada al atravesar las superficies de líquidos o contenciones. La luz de CC excesiva puede dar por resultado una menor sensibilidad y/o conteo de partículas falsos. Para evitar esta

situación, siga las instrucciones que acompañan su contador de partículas, puesto que como sucede con la mayor parte de los instrumentos, la limpieza debe estar a cargo del usuario. Siga con cuidado las instrucciones y, si no está seguro de lo que está haciendo, no siga adelante. Comuníquese con el fabricante para obtener más instrucciones.

APLICACIONES DE LOS CONTADORES DE PARTÍCULAS

En esta parte se describe cómo se puede emplear el equipo de conteo de partículas.

Seguimiento de tendencias

Rara vez resulta útil conocer cuántas partículas hay en un ambiente; es más útil saber si la contaminación del ambiente crece o se reduce en el tiempo. Esto se conoce como *seguimiento de tendencias* y los contadores de partículas proporcionan un análisis detallado de las tendencias en la contaminación particulada. Esto es, los contadores monitorean cambios graduales o repentinos en los niveles de contaminación del entorno. Esta información puede indicarle al operador si hay un problema de filtraciones, si una herramienta o proceso está contaminado o si alguien dejó una puerta o una válvula abierta.

Hay aplicaciones más sofisticadas para los contadores de partículas. Dichas aplicaciones serán tratadas más adelante.

Muestreo estadísticamente válido

Este es un concepto importante que se explicó anteriormente pero vale la pena repetirlo. Una muestra estadísticamente válida es la muestra de medios que resulte representativa, tanto en contenido como en características, de los medios que se estén comprobando. Los conteos de partículas pueden ser mayores dentro de corrientes de convección o posados en superficies, pero en general, los principios de la difusión muestran que el muestreo de una zona de la sala proporcionará datos similares a otra zona del mismo ambiente.

Normalización de los datos

Un contador de partículas toma muestras de los medios a un caudal constante y cuenta las partículas presentes en los medios. Los datos recogidos por el contador de partículas pueden verse de dos maneras:

- *Conteos en bruto*: cantidad total de partículas en un canal de tamaño específico. Los conteos en bruto no se calculan como una función del volumen de muestra, así que los datos no informan valores de contaminación volumétricos. Estos datos son útiles en algunas aplicaciones, así como también en la calibración del instrumento.
- *Conteos normalizados*: el número total de partículas dividido por el volumen de muestra. Los conteos normalizados relacionan los conteos de partículas con los volúmenes de muestra, así que los datos informan concentraciones de partículas por unidad de volumen (pie^3 , m^3 , ml, etc.).

Parte IV.

Hardware y accesorios

En esta parte se describen las distintas clases de contadores de partículas y el hardware asociado. Asimismo, hablamos de las aplicaciones específicas para cada tipo de contador de partículas.

CONTADORES DE PARTÍCULAS DEL AIRE

Los contadores de partículas del aire detectan y miden la contaminación particulada en el aire. Típicamente, monitorean la contaminación de partículas en ambientes limpios, como salas blancas o minientornos. Además del monitoreo del aire en un ambiente, los contadores de partículas del aire pueden controlar las partículas presentes en el aire de una herramienta de procesamiento grande.

El monitoreo de la eficacia del filtro es otra de las aplicaciones comunes. El contador de partículas extrae muestras del aire mientras entra y sale del filtro. La cantidad de conteos entrantes (circulación hacia dentro) se compara con la cantidad de conteos salientes (circulación hacia fuera). La proporción de esos dos valores determina la eficacia del filtro. Si se desea realizar una comprobación sin atención presente, el contador de partículas puede incluir alarmas ante límites de partículas aceptables y enviar una notificación cuando el filtro no pasa la prueba de eficacia.

El monitoreo, la verificación y la comprobación de salas blancas representan la aplicación más habitual para los contadores de partículas del aire. Esos contadores de partículas se colocan cerca del proceso a comprobar y recogen datos en forma constante. Cuando la contaminación aumenta por encima de los límites programables del contador de partículas, una alarma audible y visual avisa al personal de mantenimiento.

En cualquier aplicación, un contador de partículas debe tomar suficientes muestras de medios, de modo que pueda proporcionar datos válidos estadísticamente. Específicamente, si extrae muestras de una sala blanca grande, el contador de partículas debe hacerlo en varios puntos dentro de la sala. Los documentos de ISO ofrecen sugerencias respecto del número de puntos de muestra:

$$\text{Número de puntos muestra} = \sqrt{\text{Area}(m^2)}$$

Por lo tanto, si una sala blanca mide 10.000 pies cuadrados, primero convierta a metros cuadrados, calcule la raíz cuadrada y luego redondee el resultado.

$$\text{Area}(m^2) = ft^2 \times 0.092903$$

$$\Rightarrow 10,000 ft^2 \times 0.092903$$

$$\Rightarrow 929.03 m^2$$

$$\Rightarrow \sqrt{929.03 m^2}$$

$$\therefore 30.48 \cong 31 \text{ sample locations}$$

El monitoreo eficaz de esta sala blanca debe incluir treinta puntos diferentes de muestreo.

Como alternativa, se puede realizar la comprobación de la sala blanca empleando uno de los métodos siguientes:

- Usando un múltiple aerosol (se describe más abajo)
- Moviendo el contador de partículas de un punto a otro
- Demostrando que la muestra estadísticamente válida se puede tomar en un solo punto

La selección de un contador de partículas del aire en particular requiere algunas decisiones. Los tamaños de canal varían de 0,06 μm , siendo el tamaño mínimo, hasta varios cientos de micrones, siendo el máximo, y según el modelo, la cantidad de canales y el tamaño puede ser ya sea

preestablecido o programable. Otras características incluyen distintos caudales, procesamientos estadísticos, modos de certificación automatizados y casi cualquier otra función que cubra casi todas las aplicaciones de las partículas del aire.

Contador de partículas del aire manual

Los contadores de partículas manuales son ligeramente más grandes que la mano de una persona y generalmente se emplean para determinar con precisión y aislar fuentes de contaminación. Pueden emplear una sonda en el extremo de una manguera que emite diferentes tonos (como un contador Geiger o un detector de metales) correspondientes a concentraciones de partículas.

Múltiples aerosol

Los múltiples aerosol utilizan un solo contador de partículas para tomar muestras de aire de muchos puntos diferentes. El múltiple aerosol es un dispositivo que generalmente está controlado por un contador de partículas con varias mangueras de aire entrante provenientes de puntos donde se toman las muestras de aire, y una manguera de aire saliente conectada al contador de partículas. El múltiple utiliza una bomba grande, proporcionando 100 pies cúbicos por minuto (CFM) de flujo de aire, para direccionar las partículas provenientes de todos los puertos al contador de partículas. Secuencial mente, el contador de partículas toma muestras de un lugar, luego tras un período (en general, un minuto), el múltiple se mueve a la siguiente manguera entrante y repite el proceso. Los múltiples bien diseñados reducen al mínimo la pérdida en la tubería de transporte y limitan la contaminación cruzada. La contaminación cruzada ocurre cuando las partículas fugan de un puerto de muestra a otro. En la figura 6 se muestran las partes básicas de un sistema múltiple aerosol.



Figura 6: Múltiple aerosol (inferior derecha), bomba (inferior izquierda) y caja de control (superior central)

Sondas de muestreo

Las sondas de muestreo se conectan al extremo del tubo de muestra y proporcionan datos más precisos. El aire de sala blanca es con frecuencia flujo laminar con velocidades que varían de cuarenta y cinco a noventa pies por minuto. Algunas sondas se ajustan para permitir la ecualización de velocidad entre el contador de partículas y el aire del ambiente; las sondas de muestreo se conocen como *isocinéticas*. De ese modo, la sonda de muestreo captura partículas a la misma velocidad que el aire de muestra, permitiendo realizar conteos de partículas normalizados con precisión. Véase la figura 7



Figura 7: Sonda de muestreo (superior) y conexión adaptador de tubería (inferior)

Difusor de alta presión

Los contadores de partículas del aire estándar toman muestras de aire a 1 pie cúbico por minuto y 1 de atmósfera de presión (14,6959 lb-pulg²). Los difusores de alta presión reducen las presiones (40 a 100 lb-pulg²) de los sistemas de gas presurizado, de modo tal que el contador de partículas del aire pueda analizar los gases. Sin embargo, los difusores de alta presión deben analizar sólo los gases presurizados inertes. Estos difusores descargan algunos gases presurizados en la sala, así que si esos gases no fueran inertes, podrían sufrirse lesiones graves.

Sensores ambientales

Los sensores ambientales pueden medir la temperatura, la humedad relativa, la presión de aire diferencial, la velocidad del aire, etc. El contador de partículas y/o el sistema de monitoreo de plantas (FMS) interpretan los datos de la sonda ambiental y los muestran en un formato que pueda ser leído.

CONTADORES DE PARTÍCULAS DE LÍQUIDOS

Los contadores de partículas de líquidos cuentan partículas en casi toda clase de líquidos: agua, ácido fluorhídrico, petroquímicos y drogas inyectables son aplicaciones comunes. A menudo, monitorean la eficacia de filtros o de los dispositivos de control de calidad en aplicaciones de muestreo por lotes.

Muestreadores de líquidos

Los muestreadores de líquidos extraen el volumen de líquido preciso y luego, empleando una tasa de suministro fija, envían la muestra al contador de partículas de líquidos. Los líquidos no presurizados son una aplicación común para los muestreadores de líquidos, incluidas pruebas dentro de vasos de precipitados o ampollas.

Si se emplea incorrectamente, un muestreador de líquidos puede producir cavitación y generar burbujas dentro del líquido. Las burbujas son un problema puesto que pueden acumular partículas (aglomeración). Además, la mayoría de las burbujas presentes en los químicos de proceso tienden a medir como partículas grandes (en general, mayores que 1 µm).

Algunos muestreadores de líquidos reducen o eliminan la efervescencia (burbujeo) a través de la compresión. El muestreador de líquidos comprende una cámara que contiene la muestra de líquido, mientras que las presiones (> 35 lb-pulg²) comprimen las burbujas y las eliminan del líquido.

Módulos de visualización

Los módulos de visualización para líquidos son análogos a aquellos utilizados para los contadores de partículas de vacío; proporcionan un método para monitorear partículas sin desviar el flujo.

Corrosivos y tuberías

El conteo de partículas suspendidas en líquidos, en especial líquidos corrosivos, requiere contadores con superficies internas mojadas que no se disolverán ni emitirán gases tóxicos cuando se hagan muestreos de sustancias corrosivas.

Particle Measuring Systems emplea varios materiales ópticos y plásticos diferentes para las superficies mojadas de los contadores de partículas de líquidos:

Ópticas

- *Sílice fundida*: Material similar al cristal, la sílice fundida es compatible con la mayoría de los químicos excepto el ácido fluorhídrico.
- *Zafirita*: Compatible con la mayoría de los químicos empleados en la industria de los semiconductores, incluido el ácido fluorhídrico.
- *Fluoruro de magnesio*: Compatible con la mayoría de los químicos, excepto el fluoruro amónico y el peróxido de hidrógeno.

Tuberías

- *Fluoruro de polivinilideno (PVDF)*: Termoplástico empleado en muchas células de muestra, pero no recomendado para el uso de largo plazo con acetona.
- *Perfluoroalkoxy (PFA) Teflon[®]*: Fluoropolímero empleado en algunas células de muestra, el PFA Teflon es poroso a algunos químicos. Entre otros materiales se incluyen Teflon[®], KalRez[®] (un costoso material para juntas tóricas) y Kel-F.

Compatibilidad química

Antes de poner cualquier sustancia química en un contador de partículas de líquidos, es importante:

- garantizar que el químico sea compatible con las superficies mojadas del contador de partículas, el muestreador de líquidos y toda la tubería accesorio (incluida la tubería de la herramienta).
- asegurarse de que el químico no reaccione con cualquier residuo químico proveniente de la muestra anterior.

Si tiene alguna duda respecto de la compatibilidad química, comuníquese con el fabricante del contador de partículas.

CONTADORES DE PARTÍCULAS EN GASES

Los contadores de partículas en gases determinan la pureza de varios gases, tanto inertes como reactivos. Un contador de partículas en gases es un contador de partículas del aire especializado que cuenta partículas sometido a presión. Algunos contadores de partículas en gases pueden tomar muestras a presiones de cilindro (hasta 150 lb-pulg²), mientras que otros son aptos para presiones de funcionamiento (reducidas).

La recogida y el análisis de muestras representativas de gases puede ser dificultoso. Entre los desafíos en las fábricas de semiconductores se cuenta la conexión del contador de partículas al suministro de gas. Típicamente, el suministro de gas se origina en una planta de procesamiento situada fuera de la fábrica de semiconductores, con tuberías de acero inoxidable de diámetro grande que transportan el gas desde la planta a la fábrica. Si la aplicación requiere el análisis de partículas en el gas antes de llegar a la fábrica de semiconductores, se deberá añadir un puerto de muestreo a los tubos de suministro de gas, donde el contador de partículas puede extraer muestras.

Sin embargo, el gas de los semiconductores no contiene muchas partículas, así que la gravedad y la difusión pueden dificultar mucho la captación de muestras estadísticamente válidas de las pocas partículas que están presentes. El método preferido para la captación de partículas requiere una conexión de tubo, con el tubo de muestra conectado a ésta e insertado en el centro del diámetro del tubo. En general, los contadores de partículas en gases adicionales se colocan cerca de los puntos de uso a modo de comprobación final de la calidad de los gases.

Algunas aplicaciones emplean sistemas de análisis de gases que constan de un difusor de alta presión "casero" conectado a un contador de partículas del aire. Los difusores de alta presión fabricados por Particle Measuring Systems contienen muchas características registradas que evolucionaron después de prolongados esfuerzos realizados para analizar el gas ultra limpio. Casi ninguno de los difusores caseros funcionaron en absoluto. Su incapacidad para el conteo a cero cuando se toman muestras de gas filtrado y la aleatoriedad de los conteos de partículas son todos los problemas que los ingenieros de Particle Measuring Systems superaron antes de que aparecieran los difusores de alta presión en el mercado.

Contador de partículas en gases versus contador de partículas del aire con difusor de alta presión

Cuando se decida si se va a emplear un contador de partículas en gases de alta presión contra un contador de partículas del aire con difusor de alta presión, considere lo siguiente:

- Costo del gas (los difusores de alta presión consumen más gas que lo que analizan)
- El caudal de muestra deseado (la mayoría de los difusores de alta presión sólo aceptan presiones de 100 lb-pulg.²)
- La huella del instrumento (debido a la tubería interna, los contadores de partículas en gases son más grandes que los contadores de partículas del aire)
- Sensibilidad al tamaño de las partículas/instrumento
- Opciones de visualización de datos

El fabricante de contadores de partículas puede hacer sugerencias relacionadas con la elección correcta para su aplicación de gas presurizado.

Parte V.

Integración de datos

En esta parte se describe cómo las tecnologías de detección de partículas funcionan juntas para atender la contaminación.

Sistemas de monitoreo de plantas

Un sistema de monitoreo de plantas (FMS) proporciona comunicaciones de datos y un punto de monitoreo central para todos los contadores de partículas, muestreadores, múltiples, sensores ambientales y otros equipos de evaluación de microcontaminación. El FMS recoge y analiza datos de partículas, luego relaciona los datos con los eventos, como puertas o válvulas abiertas, fallos de los filtros o problemas de flujo.

Una planta de fabricación de productos farmacéuticos con salas blancas (figura 6) ilustra los contadores de partículas habitualmente empleados que funcionan dentro de un FMS. A continuación se ofrece una explicación detallada de los componentes.

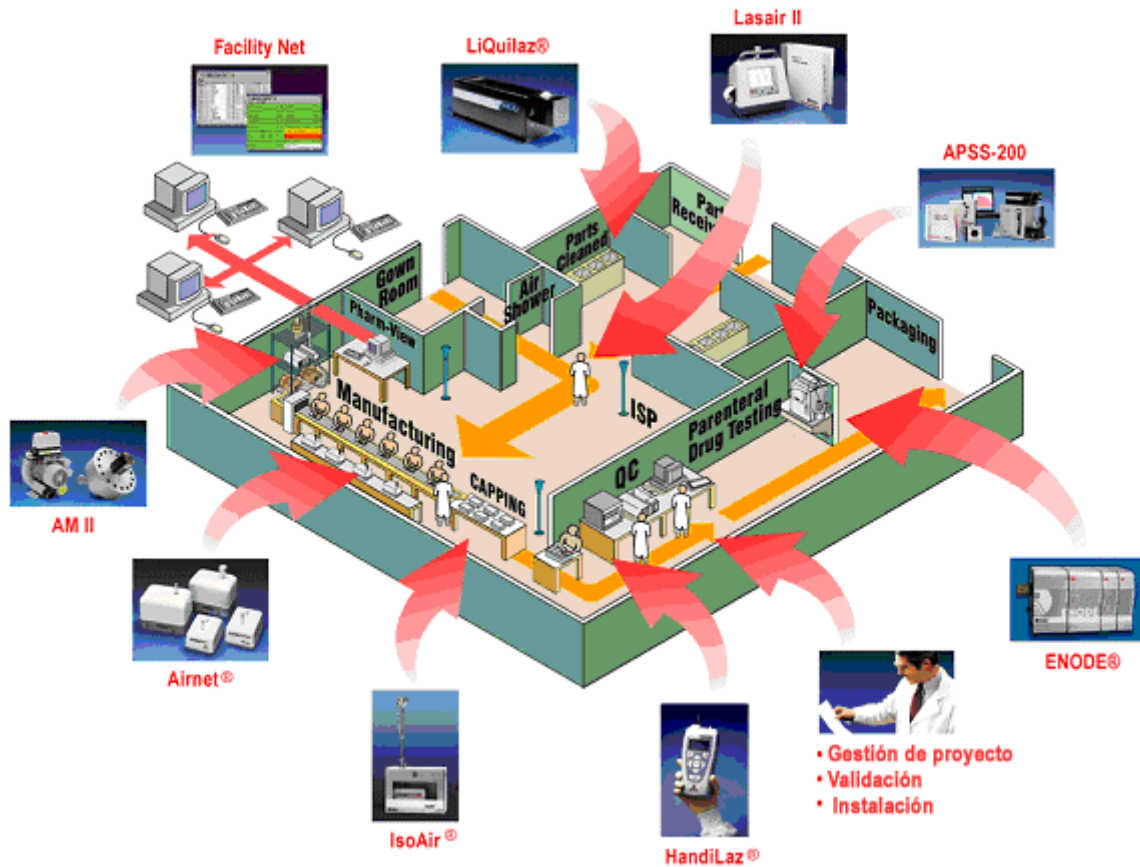


Figura 6: Planta de fabricación de productos farmacéuticos

Software de los sistemas de gestión de planta (Facility Net)

El software de los sistemas de gestión de planta permite que el operador reciba el estado desde todos los dispositivos conectados. El software posee funciones para disparar alarmas, generar informes y gráficos, analizar datos, realizar procesos estadísticos y notificar a usuarios (a través de correo electrónico o sistemas de buscadores) de los problemas que ocurren en la planta.

Cada dispositivos de conteo de partículas se conecta al computador del sistema de gestión de planta. En la figura 6, el software Facility Net de Particle Measuring Systems sirve como estación de control central para cada dispositivo y administra todos los datos recopilados. Otros computadores conectados a la red del sistema de gestión de planta pueden ver los datos en tiempo real. Además de las características mencionadas, el software Facility Net puede realizar lo siguiente:

- Analizar datos de partículas
- Hacer un seguimiento de las tendencias en partículas
- Disparar alarmas locales y/o a distancia si ocurren estos problemas:
 - Los conteos máximos de partículas exceden los límites
 - Las temperaturas exceden los valores mínimo/máximo
 - La humedad relativa excede los valores mínimo/máximo
 - Vencimiento de la calibración
 - Las medias de partículas exceden los límites

LiQuilaz® (contador de partículas de líquidos) para limpieza de piezas y baños ácidos

En esta parte de la planta, un baño ácido o los líquidos de proceso requieren comprobación. El monitoreo de la eficacia del filtro de líquido requiere dos contadores de partículas de líquidos, pero el monitoreo de ácido exige un muestreador de líquidos corrosivos. El cálculo de la eficacia del filtro es una comparación entre la cantidad de contaminación de partículas en el líquido antes del filtrado y la cantidad después del filtrado. Esta comprobación determina cuándo los filtros deben ser reemplazados, si se ha perforado un orificio en los medios de filtrado o si el líquido está muy sucio para ser empleado.

Contador portátil LASAIR® II (contador de partículas del aire)

Este contador de partículas del aire puede determinar fuentes particuladas localizadas, certificar la sala blanca, hacer comprobaciones puntuales de filtros HEPA o determinar la pureza general del aire en la planta. Las inspecciones periódicas de las instalaciones exigen la comprobación de todos los filtros, así que es imperativo el uso de un contador de partículas del aire.

APSS-200 (contador de partículas de líquidos)

El sistema de muestreo con jeringa APSS-200 está diseñado para clasificar por tamaño y contar materia particulada en una amplia gama de líquidos. Este sistema toma muestras de lotes pequeños, cumple con todos los requisitos actuales de la comprobación USP <788> y puede adaptarse a futuros cambios en las regulaciones. A diferencia de las aplicaciones de semiconductores, donde las partículas submicrónicas afectan el producto, las aplicaciones parenterales requieren contadores de partículas que detecten partículas mayores que 2 µm.

ENODE® (controlador de E/S)

ENODE es un dispositivo modular de Ethernet (en red) que se integra directamente al software Facility Net. El ENODE monitorea entradas digitales y analógicas, contactos de salida de alarmas (digital o relé) y envía los datos al software para su análisis. Las entradas pueden incluir sensores de temperatura, humedad relativa o interruptores electrónicos que notifican al software cuándo una puerta del proceso está abierta. El dispositivo ENODE es la solución para una amplia gama de aplicaciones de monitoreo y control.

Gestión de proyecto, validación e instalación

Cada sistema de contaminación debe contar con gente que entienda los datos de partículas y proporcione soporte a áreas que sufren alta contaminación particulada. La validación e instalación ocurren en las primeras etapas de la integración del sistema, siendo un organismo externo el encargado de validar, mientras que la instalación podrá estar a cargo de recursos internos o externos. La gestión continua del sistema de control de contaminación exige experiencia y compromiso por parte del personal responsable de mejorar los procesos.

HandiLaz® Mini (contador de partículas del aire manual)

Los contadores de partículas manuales, como el *HandiLaz® Mini*, poseen un diseño ergonómico que les permite adaptarse a la palma de la mano. Los contadores de partículas manuales son fuertes, confiables y ofrecen un valor impresionante a los usuarios interesados en el costo que necesitan realizar comprobaciones puntuales y aislar fuentes localizadas de contaminación particulada.

IsoAir® (contador de partículas del aire)

Las áreas que procesan directamente sustancias químicas o drogas emplean sensores IsoAir para identificar desperfectos en la protección de zonas críticas. Estos sensores compactos y sencillos de instalar proporcionan un rendimiento sin precedentes en una caja de acero inoxidable resistente a los químicos y fácil de desinfectar.

Fabricación y control de calidad

Ciertas operaciones de ensamblaje, comprobación y embalaje se realizan dentro de un entorno de sala blanca ISO Clase 5. Los múltiples aerosol, ISP y contadores de partículas monitorean eficazmente estas áreas para cumplir con las normas de limpieza.

Airnet® (contador de partículas del aire) y AM-II (múltiple aerosol)

Los contadores de partículas y el múltiple, junto con las sondas isocinéticas, monitorean las salas blancas ISO Clase 4 ó 5 (FS-209e Clase 10 ó 100), junto con el área de espacio para equipos ISO Clase 6 (FS-209e Clase 1000). Un múltiple aerosol puede monitorear económicamente muchas áreas diferentes o varios puntos en una misma área, garantizando muestras estadísticamente válidas.

Por otro lado, los múltiples aerosol no son aptos para todas las aplicaciones puesto que exhiben una cierta cantidad de pérdidas de partículas y retardos de muestreo interno. La pérdida de partículas se produce porque los conductos de muestreo del múltiple pueden ser largos (hasta 125 pies). Las partículas mayores a un micrón no se desplazan muy lejos, así que la gravedad y las curvas de los tubos harán que éstas se adhieran a la pared interna de la tubería. Los retardos en muestreos internos ocurren cuando el múltiple cambia de un puerto de muestra a otro. Las partículas pueden escapar a la detección mientras el múltiple está cambiando puertos de muestreo.

Parte VI.

Glosario

acreción	tendencia de las partículas a la aglomeración
adherencia electrostática	tendencia de las partículas a adherirse a cosas como resultado de la electricidad estática
advección	transporte horizontal de partículas en el aire o en líquidos
aerosol	suspensión de partículas y vapor de agua en el aire
aglomeración	juntarse en una masa, como las partículas que se adhieren a una burbuja de gas en un líquido
agua DI	agua desionizada; agua de la cual se ha eliminado un ion, convirtiéndola en un agente de limpieza agresivo
albedo	reflexión o brillo de una partícula
analizador de altura de pulso	dispositivo que recoge pulsos eléctricos y los relaciona con los tamaños relativos de las partículas; abreviatura: PHA
anhídrido	que carece de agua; seco
cavitación	formación de burbujas en un líquido, a menudo causado por llenar rápidamente una jeringa de muestra o el movimiento del impulsor de una bomba
clase	calidad de una sala blanca, expresada en el número máximo de partículas de 0,5 μm por pie cúbico (o metro, en el sistema ISO)
colimación	haz de luz enfocado de modo tal que los bordes del mismo sean paralelos
contador de partículas	dispositivo que cuenta partículas
conteos en bruto	conteos de partículas que no están normalizados para el volumen de muestra
convección	transporte vertical de partículas en el aire o en líquidos
corrientes	movimientos de un fluido en un volumen dado
depósito	lugar de almacenamiento electrónico para el pulso eléctrico generado por un fotodetector, a veces llamado <i>canal</i>
difusión	acción donde las partículas migran de un área de mayor concentración a un área de menor concentración
disecado	estado de haber sido secado
dispersión	reflexión de luz mediante el tránsito de una partícula en un haz de láser; un método de conteo de partículas óptico; comparar con extinción

doblete	par de partículas que se juntan
espectrómetro	tipo de contador de partículas que emplea sólo el centro del haz de láser para contar partículas
estadísticamente válido	una pequeña muestra; muestra con contenido particulado que representa el volumen total
extinción	técnica de conteo de partículas basada en la iluminación a contraluz del volumen de visualización y el análisis de las sombras proyectadas por las partículas
filtro HEPA	abreviatura en inglés correspondiente a los filtros de aire particulado de alta eficiencia que eliminan el 99,99% de las partículas mayores que 0,3 micrones
filtro ULPA	abreviatura en inglés para filtros de aire de penetración ultrabaja que elimina el 99,9997% de partículas mayores que 0,12 micrones
fluido	cualquier líquido o gas
flujo laminar	en fluidos, un flujo uniforme, en capas
flujo turbulento	movimiento de aire o fluido violento
FMS	abreviatura en inglés para sistema de monitoreo de plantas: un sistema de hardware, software y cableado de computador que monitorea y controla el equipo de conteo de partículas en una instalación
fotodetector	dispositivo que detecta luz y la convierte en pulsos eléctricos
hidratado	que contiene agua o líquido
inerte	que no vive, que está muerto
inorgánico	no proveniente de una fuente orgánica (animal o vegetal)
in-situ	palabra en latín que significa <i>en el lugar</i> y describe una clase de contador de partículas que observa una pequeña parte del volumen de la muestra
ISO	abreviatura en inglés correspondiente a Organización internacional de normalización
LASER	abreviatura en inglés correspondiente a amplificación de la luz mediante la emisión simulada de radiación, que es una luz coherente de alta intensidad
líquido	fluido que no es gaseoso ni sólido

luz coherente	haz de luz cuyos fotones tienen las mismas propiedades ópticas (longitud de onda, fase y dirección)
microcontaminación	partículas que son perjudiciales para el proceso de fabricación
micrón	forma truncada de la palabra micrómetro, unidad de medida igual a 10^{-6} metros (1/1000 de un milímetro); símbolo: μm
minientorno	una sala blanca en miniatura
módulo de visualización	pequeña cámara con ventanas que se instala en un conducto y permite que el haz de láser se refleje a través
monitor	tipo de contador de partículas que emplea la anchura total del haz de láser para contar partículas
movimiento browniano	el movimiento browniano es el movimiento aleatorio de partículas pequeñas debido a colisiones con moléculas, en general, el movimiento browniano influye partículas con un diámetro igual o menor que 0,1 micrones
MTBF	abreviatura en inglés correspondiente a duración media entre fallas definida como el tiempo (en horas) que posiblemente un componente electrónico o pieza de equipo funcione antes de que falle
Norma federal 209	regulaciones obsoletas del gobierno de los EE.UU. que definieron cómo se clasificaban las salas blancas
normalización	formateo de datos a fin de que sean útiles otorgándose contexto al volumen
orgánico	que surge de materia viva, ya sea animal o vegetal
partículas	piezas muy pequeñas hechas de diversas sustancias
plato testigo	superficie de comprobación colocada en un entorno limpio para recoger partículas destinadas a una posterior medición
sala blanca	entorno de fabricación que está diseñado para reducir al mínimo la contaminación particulada mediante el uso de filtros, protocolos y diseño
seguimiento de tendencias	uso de un contador de partículas para seguir las tendencias de largo plazo en la microcontaminación dentro de un volumen dado
vacío	ausencia de gas o líquido en un volumen dado
variación térmica	irregularidades de temperatura en un volumen de fluido que contribuye al movimiento de fluido
viable	que vive

volumen de visualización	volumen de aire o líquido que atraviesa el sistema de detección de partículas
volumétrico	tipo de contador de partículas que analiza toda una muestra