



Guías de Eficiencia Energética para la industria

37. Acondicionamiento de cuartos limpios



En colaboración:



Agosto 2024



Acondicionamiento de cuartos limpios

Autor: Miguel Á. Hinojosa Navarro y Rubén F. López Arrañaga, Comercializadora Mar Control

¿Qué es un cuarto limpio?

La calidad del aire interior es de gran importancia para la salud y el confort humano. El aire, ya sea del exterior o recirculado dentro de un área, actúa como un vehículo de transporte para los contaminantes que son traídos por el movimiento de las personas, materiales, etc. Dado que muchos de estos contaminantes que son transportados por el aire son dañinos para productos o personas que están presentes o trabajando en tales ambientes su eliminación es necesaria por motivos médicos, sociales, legales o financieros.

Los cuartos limpios son espacios especialmente construidos con ambientes controlados donde la concentración de partículas en el aire (contaminantes) es mantenida dentro de límites específicos. Los cuartos limpios entonces no deben dejar introducir contaminantes del exterior dentro del ambiente controlado. Además, los aparatos o equipos presentes dentro de este ambiente no deben de generar ni dar lugar a generar contaminantes (por ejemplo, como resultado de fricción entre superficies, reacciones químicas o procesos biológicos). Al mismo tiempo, no se debe permitir que los contaminantes se acumulen en el ambiente controlado. Por último, los contaminantes existentes deben eliminarse lo más rápido y en la mayor medida posible.

La única manera de controlar la contaminación dentro de un cuarto es controlar el medio ambiente total del mismo. Es necesario controlar rigurosamente los caudales y dirección del flujo de aire, la presurización, la temperatura, la humedad y la filtración especializada. Además, las fuentes de estas partículas deben controlarse o eliminarse siempre que sea posible. Un cuarto limpio implica mucho más que filtros de aire. Los cuartos limpios se planifican y fabrican utilizando protocolos y métodos estrictos.

Como referencia, el diámetro del cabello humano puede variar entre los 15 y 170 micrones. Una partícula 200 veces mas pequeña (0.5 micrones) puede causar desastres mayores en cuartos limpios. El telescopio Hubble de la NASA en Estados Unidos en una ocasión fue dañado y dejado fuera de operación por una partícula más pequeña que 0.5 micrones.

Estos cuartos se encuentran con frecuencia en las industria electrónica, aeroespacial, farmacéutica, biofarmacéutica, fabricación de dispositivos médicos, entre otros.





El ISO 14644-1 define a un cuarto limpio como: “Un cuarto en el cual la concentración de partículas en el aire es controlada, y el cual es construido y utilizado de manera que se minimice la introducción, generación y retención de partículas en el interior del cuarto y en el que otros parámetros relevantes como temperatura, humedad y presión son controlados como sea necesario”.

Clasificación de cuartos limpios

La especificación de los cuartos limpios en base al particulado (como el polvo) es definida de acuerdo al tamaño máximo de partícula (diámetro) permitido junto con la cantidad máxima de número de partículas por unidad de volumen. Para contaminantes que no son partículas suspendidas se especifica la cantidad máxima de densidad en términos de moléculas por metro cúbico, o microbios por metro cúbico.

Existen diversos estándares en todo el mundo para clasificar los cuartos limpios (tabla 1 y 2).

Tabla 1. Clasificación de cuartos limpios por nivel de partículas en el aire (por metro cúbico).

Clase	Numero de particulas por metro cubico por tamaño de partícula en micrómetros					
	0.1 micrómetros	0.2 micrómetros	0.3 micrómetros	0.5 micrómetros	1 micrómetros	5 micrómetros
ISO1	10	2				
ISO2	100	24	10	4		
ISO3	1,000	237	102	35	8	
ISO4	10,000	2,370	1,020	352	83	
ISO5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
ISO6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO7				352,000	83,200	2,930
ISO8				3,520,000	832,000	29,300
ISO9				35,200,000	8,320,000	293,000





Tabla 2. Clasificación de cuartos limpios.

Estándar ISO	U.S.A. 209A,B	U.S.A. 209C	U.S.A. 209D	U.S.A. 209E	Reino Unido BS 5295	Australia AS 1386	Francia AFNOR X44101	Alemania VDI.2083	Japón JACA	Unión Europea GGMP
ISO Clase 1										
ISO Clase 2								0		
ISO Clase 3		1	1	M1.5	C	0.035		1	3	
ISO Clase 4		10	10	M2.5	D	0.35		2	4	
ISO Clase 5	100	100	100	M3.5	E o F	3.5	4,000	3	5	A/B
ISO Clase 6		1,000	1,000	M4.5	G o H	35		4	6	
ISO Clase 7	10,000	10,000	10,000	M5.5	J	350	400,000	5	7	C
ISO Clase 8	100,000	100,000	100,000	M6.5	K	3,500	4,000,000	6		D
ISO Clase 9										

En 1992, la organización internacional de estándares (ISO) estableció el comité técnico ISO/TC 209 con el objetivo de armonizar los estándares internacionales. En 1999, los estándares ISO 14644 partes 1 y 2 fueron publicados y hasta la fecha se siguen publicando y actualizando diversas secciones (Tabla 3).

Tabla 3. Estándares de cuartos limpios ISO 14644.

Parte 1	Clasificación de aire limpio por concentración de partículas
Parte 2	Monitoreo de concentración de partícula y desempeño de cuarto limpio
Parte 3	Métodos de prueba
Parte 4	Diseño, construcción y "start-up"
Parte 5	Operaciones
Parte 7	Dispositivos de separación (campanas limpias, cajas de guantes, aislantes y mini ambientes)
Parte 8	Clasificación de aire limpio por concentración química (ACC)
Parte 9	Clasificación de limpieza de superficies por concentración de partículas
Parte 10	Clasificación de limpieza de superficies por concentración química
Parte 12	Clasificación de aire limpio por concentración de particulado en nano escala
Parte 13	Limpieza de superficies para definir niveles de limpieza en términos de particulado y clasificaciones químicas
Parte 14	Evaluación de capacidad de uso de equipos en función de concentración de partículas en el aire
Parte 15	Evaluación de capacidad de uso de equipos y materiales en función de concentración de químicos suspendidos en el aire
Parte 16	Eficiencia energética en cuartos limpios





Elementos clave en el diseño HVAC de cuartos limpios

La integridad del ambiente de un cuarto limpio es creada por el diferencial de presión comparado con las áreas adjuntas a través de un sistema de HVAC (Calefacción, Ventilación, Aire Acondicionado en sus siglas en inglés). Los requerimientos para estos sistemas en cuartos limpios incluyen:

Inyección de flujo de aire en volumen y limpieza suficiente para mantener las renovaciones de aire necesarias en el cuarto limpio. Normalmente un cuarto requeriría entre 2 a 10 cambios de aire por hora, pero en un cuarto limpio típico requiere normalmente de 20 – 60 cambios de aire o incluso llegar hasta 600 cambios en una hora.

Introducir aire de una manera que no se generen zonas dentro del cuarto limpio con aire estancado donde podría acumularse particulado.

Filtrar el aire recirculado y exterior a través de filtros de partículas de alta eficiencia (HEPA). Los filtros HEPA normalmente se colocan en la parte final del sistema para asegurar

Acondicionar el aire para cumplir con los requerimientos de temperatura y humedad del cuarto limpio.

Asegurar suficiente aire nuevo (Make up air) para mantener una presión positiva dentro del cuarto especificada. Esto se logra al inyectar mas aire en el cuarto que el que se extrae.

Hay mucho mas que estos pequeños puntos en el criterio de diseño de un sistema de HVAC para cuartos limpios en términos de tecnología de equipos, tipos de filtración, eficiencia, distribución de aire, cantidad de presurización, niveles de ruido, conservación y eficiencia energética, etc.

Por estas razones los sistemas de HVAC para cuartos limpios son dramáticamente diferentes a los sistemas convencionales de confort. Una oficina normalmente contiene entre 500,000 y 1,000,000 de partículas (0.5 micrones o de mayor tamaño) por pie cúbico en su espacio mientras por ejemplo un cuarto ISO 4 su diseño está hecho para nunca permitir más de 352 partículas (0.5 micrones) por pie cubico.

Ventilación y renovaciones de aire

Los volúmenes de ventilación y renovaciones de aire se diseñan de acuerdo la cantidad requerida para mantener la calidad del aire interior, reemplazar el aire y presurización del edificio asegura que el dióxido de carbono y el oxígeno permanezcan en balance, y que el formaldehído y otros vapores generados por materiales de edificio y los muebles se diluyan. De esta manera las renovaciones de aire ocurren con suficiente frecuencia para minimizar el riesgo de una alta concentración de contaminantes en el aire al interior del cuarto limpio.





Flujo de aire

El flujo del aire es definido como la velocidad promedio del aire dentro del cuarto o como los cambios de aire por hora en el mismo.

Tabla 4. Velocidad y cambios de aire por hora para cuartos limpios.

Clase (ISO / Fed 209)	Velocidad de Aire (fpm)	Cambios de aire por hora
ISO 1 (-)	70 - 130	>750
ISO 2 (-)	70 - 130	>750
ISO 3 (1)	70 - 130	360 - 540
ISO 4 (10)	60 - 90	360 - 540
ISO 5 (100)	35 - 90	210 - 5400
ISO 6 (1,000)	20 - 50	120 - 300
ISO 7 (10,000)	5 - 20	30 - 120
ISO 8 (100,000)	2 - 10	12 - 60

De acuerdo con el Handbook de la ASHRAE, HVAC Applications, el estándar Fed 209, no especifica requerimientos de velocidad. Por muchos años 90 fpm (pies por minuto) se ha utilizado para especificar el flujo de aire en los cuartos limpios. Esto con el objetivo de mantener un flujo de aire laminar que asegure la dilución de concentración de partículas, así como la expulsión de particulado en el cuarto. Y aunque una mayor velocidad de aire podría tener ventajas en la remoción de partículas, también resultaría en un sobredimensionamiento del equipo de HVAC lo cual no sería eficiente energéticamente.

Presurización

La presurización de las áreas sensibles en los cuartos limpios es una manera efectiva para controlar la infiltración de contaminantes a través de fugas en el perímetro del cuarto y así asegurar un flujo de aire desde el espacio más limpio al menos limpio. Para mantener una presión estática positiva o mayor a la presión atmosférica se logra al inyectar mayor aire del que se extrae del espacio. Es importante recalcar que el aire introducido para presurizar el cuarto debe ser filtrado y acondicionado adecuadamente.

Tabla 5. Diferenciales de presión entre cuartos limpios y cuartos adyacentes

Diferencial de presión	in w.c.	Pa
Cuartos limpios - Espacios no limpios adyacentes	0.05	12.5
Cuartos limpios - Espacios menos limpios adyacentes	0.02 - 0.03	5 - 7.5





Generalmente se recomienda una presión de 0.05 in w.c. (pulgadas de columna de agua) en el espacio limpio relativa a las áreas no clasificadas. Y en áreas limpias con múltiples cuartos se recomienda que las áreas más sensibles sean las que tengan la mayor presurización manteniendo una presión positiva entre 0.02 y 0.03 in w.c. entre los cuartos limpios con diferente clasificación o grado de limpieza.

La única excepción a utilizar presión diferencial positiva en cuartos limpios es cuando se manejan materiales peligrosos específicos que las agencias de salud y seguridad regulatorias requieren que el cuarto mantenga una presión negativa.

Filtración

Cualquier aire introducido al cuarto limpio debe pasar por un sistema de filtración. La filtración del aire involucra la separación de particulado y contaminantes del flujo del aire. Existen diversos métodos de filtración dependiendo del tamaño de partícula o tipo de sustancia que se desea separar del aire.

En los cuartos limpios el aire entrante pasa o es tratado con uno más tipos de filtros. Los filtros HEPA (High Efficiency Particle Arrester) son el tipo de filtro más común utilizado en cuartos limpios.

El estándar 52.2 de la ASHRAE cuantifica la eficiencia de los filtros en diferentes rangos de tamaño de partícula dando como resultado el sistema de clasificación MERV (Minimum Efficiency Reporting Value) entre 1 y 16. Este sistema de clasificación numérico hace más sencillo evaluar y comparar los diferentes tipos de filtros mecánicos disponibles, así como aclarar el nivel de eficiencia que tienen.

Los filtros HEPA no se clasifican en MERV ya que exceden el protocolo de prueba del estándar 52.2 de la ASHRAE. Estos filtros son probados y certificados para cumplir con una eficiencia específica a un tamaño de partícula específico. Todos los filtros HEPA deben cumplir con un mínimo de eficiencia del 99.97% a 0.3 micrones.

Temperatura y Humedad

Los requerimientos de temperatura y la humedad en un cuarto limpio deben de ser definidos desde las primeras etapas de la fase de conceptualización del cuarto. Cada estrategia de diseño de cuarto limpio es única al proyecto y debe de ser analizada minuciosamente para cumplir con la carga térmica necesaria del mismo.





Fuentes

- ASHRAE. (2017). Standard 52.2. Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- ASHRAE HANDBOOK. (2019). Heating, Ventilating and Air-Conditioning APPLICATIONS . Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- Bell, A. A., & Angel, L. W. (2016). HVAC Equations, Data, and Rules of Thumb (Tercera ed.). Mc Graw Hill.
- Castaño Sánchez , J. C., & Orozco Hincapié , C. A. (2008). Metodología para el diseño de cuartos limpios. Scientia et Technica Año XIV(38), 187-192.
- Garner, R. (16 de Abril de 2008). NASA's Clean Room: Last Stop for New Hubble Hardware. Obtenido de NASA: <https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasas-clean-room-last-stop-for-new-hubble-hardware/>
- GSA. (1992). Federal Standard 209E. Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and CleanZones. U.S. General Services Administration.
- International Organization for Standardization. (12 de 2015). ISO 14644-1:2015. Obtenido de International Organization for Standardization: <https://www.iso.org/standard/53394.html>
- Naughton, P. (2019). History of Cleanrooms. ASHRAE, 38-54.
- White, W. (2001). Cleanroom Technology Fundamentals of Design, Testing and Operation. John Wiley and Sons Inc.

