



ISO 14644-16: La eficiencia energética llega a las salas limpias

En 2013 ASHRAE estimaba que la superficie de salas limpias construida en el mundo superaba los 12 millones de m², con un crecimiento anual del 5%; por lo que es de suponer que a fecha de hoy esa cifra haya superado largamente los 15 millones de m².

MIGUEL RUIZ
INNTEGRAPHARMA

Las salas limpias tienen aplicación y uso en un rango cada vez más amplio de actividades industriales y de investigación; ya no están ligadas solo a sectores de alta tecnificación y alto valor añadido. Sin embargo, los criterios de diseño, cálculo, construcción y explotación de salas limpias se han mantenido, prácticamente sin cambios, desde los tiempos en los que estas salas se diseñaban para industrias de alto valor añadido y que, además, eran tiempos de costes energéticos bajos.

En la actualidad la situación ha cambiado, los usuarios de salas limpias pertenecen a

sectores muy diversos, y muchos de ellos con condicionantes de mercado y de expectativas de retorno de inversión más modestas y, además, en una situación común de aumento creciente de los costes energéticos.

Aún quedan sectores de usuarios de salas limpias, que por su tecnificación y excepcionalidad mantienen un alto valor añadido de sus productos, con retornos de inversión muy altos; pero incluso estos casos, están sometidos a una presión social, institucional y mediática para reducir sus consumos energéticos.

En esta línea se ha editado la parte 16 de la famosa ISO 14644 “salas limpias y Locales Anexos Controlados”, dedicada a la eficien-

cia energética en las salas limpias. Esta norma define el proceso para reducir y optimizar los costes energéticos, actuando de forma global sobre el proceso de ciclo de vida de la sala limpia, desde el diseño conceptual hasta el desmantelamiento y puesta fuera de uso. Es de aplicación no solo a salas de nueva construcción o en proceso de reforma, también es aplicable a salas limpias existentes y activas.

Enfoque sistemático

ISO 14644-16 propone un enfoque sistemático para la evaluación del ahorro de energía basado en siete pasos:

1. Revisión de los Requisitos de Usuario

- (URS) y examen del diseño desde el punto de vista de la eficiencia energética
2. análisis comparativo de los rendimientos de la sala limpia
 3. Identificación de las oportunidades de reducción de energía
 4. Evaluación del impacto de las oportunidades de reducción de energía
 5. Selección de las oportunidades de reducción de energía
 6. Implementación
 7. Monitorización y retorno de experiencia

URS:

Los Requerimientos de Usuario (URS) son la "primera piedra" en la construcción de una sala limpia y de su correcta definición depende en gran medida el consumo energético de la futura instalación.

ISO 14644-16 concede una importancia capital a una correcta y equilibrada redacción de URS:

A veces se considera que cuanto más estrictas y restrictivas serán las condiciones

que se exigen a la sala limpia mayor será su calidad; en realidad la sobre-especificación solo da "aparición" de calidad y añade complejidad técnica, coste de instalación y coste de explotación.

Por ejemplo, condiciones como temperatura y humedad definidas con límites más estrictos de los necesarios pueden tener un impacto económico importante sin aportar valor de calidad. En muchas salas limpias los productos o materiales procesados tienen unos límites termo-higrométricos más amplios que los límites de confort de los operarios. En este sentido ISO 14644-16 recuerda que los límites de confort generalmente admitidos para la humedad relativa están en el rango de 30-70%, sin embargo, es muy común encontrar especificaciones de humedad relativa interior de 40-60% o 45-55% en instalaciones que son eminentemente de confort.

Otro factor importante donde la sobre-especificación es contraproducente es en la "huella" de la sala limpia; cuanto más gran-

de es una sala o zona limpia mayor será su coste energético. Por tanto, las URS deben ayudar a definir un layout racional, donde los espacios están ajustados a sus necesidades reales y coordinados en función del flujo de proceso para perder el menor espacio posible en pasillos y zonas de conexión

Hay conceptos en los que paradójicamente la sobre-especificación puede ayudar a la racionalización energética. El personal es el mayor foco de contaminación de una sala limpia y por tanto la mayor parte del esfuerzo de diseño va destinado a eliminar la contaminación aportada por las personas; por tanto, una especificación más estricta de la vestimenta dentro de la sala limpia reducirá la contaminación emitida y por tanto el trabajo de la instalación para mantener las condiciones de clasificación.

Volumen de aire

El movimiento de aire junto con la compensación de temperatura y humedad es una de las principales fuentes de consumo energé-

Servicio Webinar Online



ORGANIZAMOS EL SEMINARIO QUE NECESITE PARA LLEGAR A LOS PROFESIONALES DE SU SECTOR

+34 672 050 625
marcos@farmaindustrial.com
farmaindustrial.com

WEBINAR ESPECIALIZADO PARA PROFESIONALES DEL SECTOR

Temática definida por la empresa contratante.

Temas de actualidad abordados por expertos.

Disponibilidad de los contenidos y las ponencias en nuestras redes sociales.

Participación de los asistentes con preguntas en directo a los ponentes.

tico en las salas limpias, por lo que la reducción del caudal de aire impulsado impacta directamente en el consumo energético. En general, el volumen de aire es proporcional al cubo de la potencia del ventilador, por tanto, una reducción a la mitad del volumen de aire reduce el consumo del ventilador en un factor de ocho

Posiblemente uno de los conceptos más extendidos y ligados a las salas limpias es el concepto de recirculaciones/hora o cambios/hora (ACH Air Changes per Hour). Es un concepto casi sagrado y prácticamente intocable. Muchas salas limpias son cuestionadas e incluso rechazadas por no cumplir escrupulosamente las ACH especificadas, independientemente de que los contejos de partículas en reposo y actividad se mantengan claramente dentro de los límites.

ISO 14644-16 desmitifica y cuestiona la utilidad real de las ACH como método de cálculo para la definición de los caudales de ventilación. La función de la ventilación en una sala limpia es eliminar las partículas generadas por la actividad en el interior de la propia sala; por tanto, la norma propone calcular el caudal de ventilación a partir de las partículas emitidas en el interior de la sala por unidad de tiempo mediante la fórmula:

$$Q = \frac{D}{\epsilon \cdot C}$$

C: Concentración requerida de partículas de un tamaño determinado (contajes/m³);

D: Tasa total de emisión de partículas del personal y de los equipos, en (contajes/s);

Q: Caudal de aire de impulsión (m³/s);

ε: Eficacia de la ventilación (adimensional).

La parte más difícil es la estimación de los parámetros D y ε

La tasa de emisión de los equipos puede suponerse realmente baja, ya que uno de los condicionantes para los equipos y materiales que entran a una sala limpia es que precisamente no generen partículas. La mayor tasa de partículas viene de las personas y depende fundamentalmente de la vestimenta y el nivel de actividad.

El parámetro ε es también difícil de estimar, ya que depende de las características y posición de las entradas y salidas de aire, de la geometría de la sala, posición de equipos, etc... Posiblemente el uso de sistemas CFD puede ayudar a esta estimación.

El parámetro C sería el nivel de partículas correspondiente a la clase ISO que se pretende conseguir, aunque la norma recomienda tomar un nivel inferior de partículas como "nivel de alerta o seguridad" Así para una ISO 7 que permite hasta 352.000 partículas/m³ de 0,5μ se debería elegir un parámetro C netamente inferior (por ejemplo 1/3 que serían 117.330, o 1/4 que serían 88.000)

En todo caso los valores D y ε siempre serán teóricos y sujetos a controversia. ISO 14644-16 propone complementar el cálculo teórico con un sistema alternativo experimental, basado en la medición real de partículas en la sala en condiciones operativas. El sistema se



desarrolla en tres etapas:

1. **Diseño:** Se determina un caudal Q1 mediante una estimación inicial de emisión de partículas y efectividad de la ventilación. Para este primer diseño pueden tomarse datos muy conservadores puesto que se considera que el caudal obtenido, Q1, será optimizado en los siguientes pasos.
2. **Ensayo:** Se ensaya el caudal Q1 en la sala en condiciones operativas y se miden las concentraciones reales para diferentes tamaños de partículas. Con los datos obtenidos se calcula un nuevo caudal Q2, generalmente menor que Q1, que conseguiría los resultados esperados.
3. **Operación:** Se utiliza el caudal Q2 en operación y se utilizan los datos de monitorización para confirmar que es el caudal adecuado o para optimizar un nuevo caudal Q3 más eficiente.

En cualquier caso, el caudal final, además de conseguir el índice de limpieza requerida no debe comprometer otros parámetros de la sala limpia como temperatura, humedad y presión.

Este nuevo enfoque deja sin valor real el concepto de recirculaciones/hora o ACH. La propia norma da un ejemplo muy claro: Dos

salas limpias con las mismas fuentes de emisión de partículas necesitan el mismo caudal de aire, pero si una tiene más altura (y por tanto más volumen) las ACH serían distintas, aunque el resultado a nivel de partículas será similar en ambas salas.

Régimen reducido, apagado y recuperación

En los periodos de inactividad, cuando el personal, que es el factor máximo de generación de partículas, no está en la sala podría reducirse el régimen de ventilación sin comprometer la clasificación de la sala. La reducción debe ir coordinada con un ajuste automático en las compuestas de retorno con el fin de mantener el régimen de presión relativa en la sala, que también podría ser de menor valor que el requerido durante el periodo de actividad.

Durante el periodo de inactividad a funcionamiento reducido es importante cerrar los puntos de acceso a la sala para evitar el ingreso de contaminación.

Durante largos periodos de inactividad puede ser más rentable parar el sistema de ventilación, para ello se debe analizar el impacto de la parada, evaluando la contaminación producida por la despresurización, la migración de partículas al interior, las necesidades de limpieza antes de reiniciar la instalación y el tiempo de recuperación necesario para volver al estado de operación.

Control adaptativo

Una vez que ISO 14644-16 desmitifica las recirculaciones/hora o ACH, la consecuencia es la desmitificación de otro concepto, también intocable hasta el momento y que va ligado a las ACH: el caudal constante en impulsión. Hasta ahora las premisas básicas de ventilación en una sala limpia eran caudal constante en impulsión y caudal variable (para control de presión) en retorno. Pero si se acepta que el caudal de impulsión depende de la emisión de partículas, la variación en la tasa de emisión de partículas implicaría la posibilidad de variación en el caudal de impulsión.

Esto introduce el concepto de "control adaptativo". Hay sectores en los que se requiere una monitorización continua de las partículas en la sala limpia; por ejemplo, Anexo 1 GMP para grados A y B o la normativa aeroespacial europea ECSS para todas las clases hasta ISO 8.

Si hay un sistema de monitorización en continuo es posible definir un procedimiento de control que ajuste el caudal de impulsión proporcionalmente a las partículas detectadas en tiempo real. No es un procedimiento sencillo, implica un filtrado y cálculo promedio de los contajes para tener una señal de control estable y considerar otros factores que deben mantenerse como la presurización y el adecuado control de temperatura y humedad. Sin embargo, bien desarrollado puede ser uno de los sistemas de gestión energética más eficiente para salas limpias.

Reducción de velocidad

En los sistemas de flujo unidireccional (UDAF), el factor determinante no es el caudal de aire sino la velocidad. El valor de $0,45\text{m/s} \pm 20\%$ ($0,36\text{-}0,54\text{m/s}$) se ha mantenido inamovible desde que fue definido en los años 60 por la US Air Force y consagrado por la venerable US FED-STD 209.

ISO 14644-16 sugiere aplicar el mismo razonamiento utilizado para reducir el caudal en las instalaciones de flujo turbulento y reducir la velocidad de las unidades UDAF en los periodos sin actividad en su interior. La norma indica que en condiciones de poca o nula actividad la velocidad podría reducirse al entorno de $0,2\text{-}0,3\text{m/s}$

La norma también sugiere evaluar la posibilidad de parar las unidades UDAF instaladas en el interior de salas limpias en los periodos de inactividad. En general el caudal de aire de un UDAF suele ser muy superior al caudal de aire de la sala limpia en la que está instalada, por lo que el ahorro energético conseguido tendrá un impacto considerable

Ventiladores

Para que una reducción de caudal se transforme en ahorro energético es necesario contar con ventiladores que puedan traducir las reducciones de caudal en reducciones de energía sin pérdidas mecánicas o de eficiencia. Para seleccionar los ventiladores de una Sala limpia se debería tener en cuenta:

- Alta eficiencia: para transformar la reducción de caudal en ahorro energético
- Variación de velocidad: para permitir un control adecuado del caudal requerido.
- Transmisión directa: Para evitar las pérdidas de transmisión entre el motor y la turbina. (Las transmisiones clásicas de correas y poleas, cuando están en buenas condiciones, consumen entre un 10 y 15% de la ener-



gía total del motor, con correas deficientes o destensadas por el uso, las pérdidas son mucho mayores.)

Filtros

Los filtros de aire son una parte esencial de las salas limpias, pero también son un factor importante de consumo energético. Las altas eficiencias de filtración implican altas pérdidas de carga y la pérdida de carga está directamente ligada con la energía necesaria para vencerla. En general, la pérdida de carga es proporcional al cuadrado de la velocidad y la velocidad es proporcional al cubo de la potencia, por lo que una reducción de pérdida de carga del 50% reduce la potencia del ventilador en un factor de 2,8.

El sobredimensionamiento de filtros es una causa importante del aumento del consumo energético en salas limpias. La adición de etapas de filtración redundantes, en número y eficacia por encima de las necesidades, incrementa exponencialmente el consumo sin añadir calidad real al ambiente clasificado.

Por otra parte, la sobre-utilización de filtros, manteniendo filtros aun efectivos, pero con alto índice de colmatación también incrementa el coste energético de la instalación. En este sentido ISO 14644-16 recomienda aplicar una política de "ciclo de vida" a los filtros, sustituyendo los filtros con criterio de eficiencia energética, es decir cuando el incremento de coste por consumo de energía supera el coste de amortización del filtro nuevo.

Cargas térmicas

Las cargas térmicas, de frío y calor, son otro de los grandes factores de consumo de energía en una sala limpia. ISO 14644-16 recomienda abordar la eficiencia energética de las cargas térmicas desde distintos ángulos:

- Reducción de la carga térmica: Incrementando la eficacia del aislamiento respecto del exterior y racionalizando las cargas internas, estudiando como minimizar o aislar las cargas térmicas interiores.
- Racionalización de los puntos de consigna: Seleccionando puntos de consigna y

rangos de variabilidad acordes con las necesidades reales de la sala. ISO 14644-16 señala la posibilidad de dejar que la humedad pueda fluctuar entre el 30 y el 70% cuando el requerimiento de control de humedad es únicamente por confort de los ocupantes. También se aconseja especificar puntos de consigna, de temperatura y humedad, más flexibles en periodos de baja ocupación o reposo.

-Racionalización del aire exterior: La toma de aire exterior (TAE) es uno de los mayores focos de carga térmica en el sistema de HVAC de una sala limpia. La tasa de aire exterior debe calcularse y justificarse en función de las necesidades de sobrepresión, oxigenación y ventilación. Es muy común determinar el caudal de aire exterior como un porcentaje del caudal total de impulsión. De acuerdo a ISO 14644-16 esta práctica no tiene ninguna base racional de justificación, no aporta calidad a la sala limpia y es una fuente de ineficiencia energética.

Lamentablemente en la versión en español editada por AENOR se ha traducido erróneamente "Fresh Air", es decir aire exterior o de reposición, como "aire limpio" por lo que algunos razonamientos como la Tasa de Renovación de Aire (ACE) o las recomendaciones de reducción del caudal de aire exterior quedan confusas y difíciles de entender en la versión en español. A lo largo del texto se mezclan dos conceptos distintos bajo la misma definición, en algunas partes del texto "aire limpio" se asocia al concepto de aire filtrado con bajo nivel de partículas, mientras que en otras partes el concepto "aire limpio" se asocia con el aire exterior de renovación.

Conclusiones

ISO 14644-16 es un documento realmente útil para racionalizar y reducir el consumo energético de las salas limpias. Ofrece una metodología bien estructurada y fundamentada que cubre todos los factores que afectan al rendimiento de las salas limpias. Su metodología es de aplicación tanto a las instalaciones nuevas o en proceso de reforma como a las instalaciones en funcionamiento.

Las industrias relacionadas con las salas limpias tienen en ISO 14644-16 un documento fundamental para mantener costes operativos viables, optar a subvenciones o exenciones ligadas a factores de eficiencia energética o cumplir políticas de responsabilidad social en sostenibilidad ●