

PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE EXPLOSIONES E INCENDIOS DE POLVO COMBUSTIBLE

Índice

	Página
1.0 ALCANCE	3
1.1 Cambios.....	3
2.0 RECOMENDACIONES PARA LA PREVENCIÓN DE DAÑOS Y PÉRDIDAS	3
2.1 Información general	3
2.2 Riesgos de explosión en salas/edificios	5
2.2.1 Construcción y ubicación.....	5
2.2.2 Actividad.....	7
2.2.3 Protección.....	7
2.2.4 Operación y mantenimiento	9
2.3 Riesgos de explosión en equipos	10
2.3.1 Información general.....	10
2.3.2 Prevención de riesgos de explosión	10
2.3.3 Mitigación de riesgos de explosión	11
2.3.4 Control de las fuentes de ignición.....	17
2.4 Colectores de polvo y ciclones	19
2.4.1 Construcción y ubicación	19
2.4.2 Protección (3.1.21).....	19
2.4.3 Control de las fuentes de ignición.....	20
2.4.4 Colectores de polvo sin cerramiento (3.1.24)	20
2.5 Conductos de conexión (3.1.25)	21
2.5.1 Actividad.....	21
2.5.2 Protección.....	21
2.6 Silos (3.1.26).....	22
2.6.1 Protección.....	22
2.6.2 Equipos y procesos.....	23
2.7 Elevadores de cangilones (3.1.27).....	23
2.7.1 Construcción y ubicación	23
2.7.2 Protección.....	23
2.7.3 Control de las fuentes de ignición	24
2.8 Secadores por atomización.....	25
2.8.1 Protección.....	25
2.9 Manipulación de grano crudo a granel.....	25
2.9.1 Equipos y procesos.....	25
2.10 Fabricación aditiva (impresión 3D) (3.1.29)	25
2.11 Riesgos de incendio en polvo	26
3.0 FUNDAMENTO DE LAS RECOMENDACIONES	27
3.1 Comentarios y asistencia técnica	27
3.1.1 ¿Hay algún problema de orden y limpieza? (2.2.4.2)	27
3.1.2 Reubicación de riesgos de explosión en exteriores (2.3.1.1)	27
3.1.3 Inertización (flegmatización) (2.3.2.3)	28
3.1.4 Determinación de efectos de las explosiones de FM Global: DustCalc (2.3.3.1).....	28
3.1.5 Dispositivos de venteo sin llama (2.3.3.1.2).....	29
3.1.6 Resistencia de los recipientes (2.3.3.1.3)	30
3.1.7 Efectos de la masa de venteo de explosión (inercia) (2.3.3.1.6)	30
3.1.8 Efecto de los conductos de venteo de explosión (2.3.3.1.7).....	31
3.1.9 Rearme de paneles de venteo de explosión (2.2.3.4 y 2.3.3.1.9).....	32



3.1.10 Efectos de la presión y las llamaradas de una explosión (2.3.3.1.11)	32
3.1.11 Obstáculos fijos cercanos a la parte frontal de los venteos de explosión (2.3.3.1.12)	33
3.1.12 Distribución de los venteos de explosión (2.3.3.1.15)	33
3.1.13 Presión de servicio del colector de polvo (2.3.3.1.17)	33
3.1.14 Aislamiento de explosiones (2.3.3.2)	33
3.1.15 Sistemas de aislamiento (2.3.3.3)	34
3.1.16 Válvulas de flotador de acción rápida (2.3.3.3.4)	34
3.1.17 Funcionamiento en vacío (2.3.3.6)	34
3.1.18 Extinción de chispas frente a supresión de la explosión (2.3.4.1)	35
3.1.19 Energía mínima de ignición (EMI) (2.3.4.2)	35
3.1.20 Separadores de materias extrañas, separadores magnéticos y otros (2.3.4.3)	36
3.1.21 Lado limpio frente a lado sucio de los colectores de polvo (2.4.2)	36
3.1.22 Venteo de explosión en ciclones (2.4.2.3)	36
3.1.23 Filtros de mangas de colectores de polvo «conductores» (2.4.3.1)	36
3.1.24 Colectores de polvo sin cerramiento (2.4.4)	37
3.1.25 Conductos de conexión (2.5)	37
3.1.26 Silos (2.6)	38
3.1.27 Elevadores de cangilones (2.7)	39
3.1.28 Equipo de reducción de tamaño (amoladoras, pulverizadores, molinos de martillo, etc.) ...	39
3.1.29 Fabricación aditiva (impresión 3D) (2.10)	39
4.0 REFERENCIAS	43
4.1 FM Global	43
4.2 Otras referencias	43
ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS	44
ANEXO B: HISTORIAL DE REVISIÓN DEL DOCUMENTO	46
ANEXO C: INFORMACIÓN DE INVESTIGACIÓN SOBRE LOS RIESGOS DE EXPLOSIÓN DE POLVO	47
ANEXO D: BIBLIOGRAFÍA	47

Lista de figuras

Figura 1. Ubicaciones recomendadas para procesos o equipos de manipulación de polvo combustible	6
Figura 2. Esquema de paneles de venteo de explosión de techo que sobresalen por encima del perfil de cubierta	8
Figura 3. Esclusa de aire giratoria	14
Figura 4. Válvula (de compuerta) de acción rápida	15
Figura 5. Válvula de flotador de acción rápida (Ventix ESI®)	15
Figura 6. Desviador de explosiones	16
Figura 7. Instalación del desviador de explosiones en interiores	16
Figura 8. Compuerta de escape de alta velocidad	16
Figura 9. Ejemplo de venteo de explosión en el codo de un conducto	22
Figura 10. Dispositivo de venteo sin llama homologado por FM (fotografía cortesía de Rembe GmbH)	30
Figura 11. Ejemplo de colector sin cerramiento	37
Figura 12. Procesos de lecho de polvo	40
Figura 13. Procesos de deposición de materiales	40
Figura 14. Impresión 3D y procesos de líquidos	41
Figura 15. Concepto de diseño de sinterización selectiva por láser (SLS) (Chemical Engineering Progress, mayo de 2014)	41
Figura 16. Sistemas 3D industriales: impresoras láser ProX300 y Concept M2	41

Lista de tablas

Tabla 1. Construcción para actividades asociadas a la manipulación de polvo	6
Tabla 2. Venteo de explosión del elevador de cangilones	24
Tabla 3. Densidad aparente típica del polvo	27

1.0 ALCANCE

En esta ficha técnica se describen las medidas preventivas recomendadas para disminuir la frecuencia de las explosiones de polvo combustible, así como los elementos de protección que ayudan a minimizar los daños provocados por una explosión de este tipo. Los riesgos de incendio en polvo se especifican en otras fichas técnicas que contienen recomendaciones detalladas específicas según la actividad. No obstante, en este documento se incluye una descripción general del historial de siniestros relacionados con los incendios en polvo.

En esta ficha técnica no se incluyen esquemas de protección y prevención de explosiones de polvo específicos para la manipulación, el almacenamiento y el procesamiento de grano. Las recomendaciones de prevención de siniestros para estas actividades se proporcionan en la ficha técnica 7-75, Grain Storage and Milling. No obstante, las recomendaciones de esta ficha técnica se pueden aplicar a los riesgos existentes en las instalaciones de manipulación de grano no exclusivos de dichas instalaciones.

La tecnología de evaluación de riesgos de explosión de polvo se expresa principalmente en unidades métricas (SI) y, por ello, estas son las unidades utilizadas en esta ficha técnica.

En esta ficha técnica se hace referencia al software DustCalc. DustCalc es un software patentado desarrollado para su uso por ingenieros de FM Global con la finalidad de dimensionar los paneles de venteo de explosión para edificios y equipos en los que existe riesgo de explosión de polvo combustible. Existen otras metodologías de dimensionamiento de paneles de venteo disponibles, pero FM Global no las utiliza.

1.1 Cambios

Abril de 2017. Revisión provisional. Se ha modificado la recomendación 2.7.2.3 sobre la protección de los elevadores de cangilones para facilitar su comprensión.

2.0 RECOMENDACIONES PARA LA PREVENCIÓN DE DAÑOS Y PÉRDIDAS

2.1 Información general

2.1.1 Todos los equipos de manipulación de polvo combustible, así como cualquier sala o edificio donde pueda haber polvo combustible y este pueda quedar en suspensión deben tratarse como si existiesen riesgos de explosión de polvo.

2.1.2 Debe implantarse un proceso de gestión de cambios en todas las instalaciones donde se manipule polvo combustible para garantizar que no se producen cambios que puedan aumentar la gravedad y las consecuencias de un riesgo existente asociado con el polvo ni se introduce un riesgo de este tipo que no existiera anteriormente. Entre los ejemplos de estos cambios se incluyen los siguientes:

- incorporación de equipos nuevos, como trituradoras, amoladoras, herramientas de corte, colectores de polvo, ciclones, etc.;
- aumento de las temperaturas del proceso, que podría dar lugar a la manipulación de materiales más secos;
- incorporación de materiales nuevos;
- modificación de la formulación de productos mediante la incorporación de materiales combustibles o la disminución de la proporción de materiales inertes;
- realización de cambios en el proceso que conlleven la reducción del tamaño de las partículas de los materiales en proceso.

2.1.3 En aquellos casos en que se hayan planificado cambios en el proceso, el equipo, la materia prima o el producto que pudieran modificar de forma significativa las propiedades del polvo, se deben volver a realizar pruebas del polvo para comprobar su explosividad.

2.1.4 Asegúrese de que su proceso de gestión de cambios tiene las siguientes características como mínimo:

- a) Cuenta con un método para identificar los cambios que deben estar sujetos al proceso de gestión de cambios.
- b) Incluye documentación del cambio propuesto.
- c) Contiene un análisis formal de las consideraciones de prevención de siniestros implicadas en el cambio propuesto.
- d) Identifica la necesidad de una formación del personal actualizada.
- e) Ofrece métodos de comunicación del cambio e informa de las consecuencias de la prevención de siniestros al personal correspondiente, como el personal de mantenimiento, los operadores, el personal de seguridad y el personal de respuesta ante emergencias.
- f) Establece los procedimientos administrativos necesarios (documentación, listas de comprobación donde se incluyen los riesgos, formación, etc.).
- g) Identifica las autorizaciones necesarias.

2.1.5 Si existe la posibilidad de que se produzca una explosión de polvo, elimine dicha posibilidad o minimice las consecuencias mediante uno de los siguientes métodos:

- a) Controle los escapes de polvo fugitivo mediante cerramientos, sistemas colectores y diseño de equipos.
- b) Ubique las operaciones de producción de polvo en zonas separadas en función de los riesgos relacionados con la actividad por construcción (barreras herméticas al polvo y resistentes a las explosiones) o distancia.
- c) Minimice las posibilidades de acumulación de polvo mediante la incorporación de elementos de construcción y equipos destinados a este fin. Para ello, es posible utilizar soluciones como cubrir o empotrar las superficies horizontales lisas y de fácil limpieza (como vigas, cerchas, etc.) e inclinar las superficies un mínimo de 60° con respecto a la horizontal.
- d) Si existe riesgo de acumulación y escapes de polvo fugitivo en los edificios, diseñe la estructura para ventilar de forma segura una posible explosión mediante una construcción que limite los daños.
- e) Ubique los equipos colectores y de transferencia de polvo en el exterior, alejados de edificios y sistemas de suministro importantes.
- f) Construya equipos que procesen o transfieran partículas combustibles para contener o ventear de forma segura una posible explosión.
- g) En los casos en los que no sea posible el venteo o contención de explosiones en el equipo, elimine el oxígeno del sistema mediante inertización o instale un sistema de supresión de explosiones.

2.1.6 Realice un mantenimiento eficaz de los equipos de producción y protección. Un programa de mantenimiento eficaz permite:

- a) identificar y eliminar de forma continuada las fuentes de polvo fugitivo;
- b) inspeccionar, probar y mantener los sistemas de detección y extinción de chispas, los dispositivos de aislamiento de explosiones y los paneles de venteo de alivio para garantizar que funcionan correctamente según las directrices del fabricante o al menos una vez al mes;
- c) probar y mantener los equipos de detección y extracción de partículas metálicas y no metálicas para asegurarse de que funcionan correctamente, como mínimo trimestralmente;
- d) comprobar la alineación de las correas y el equipo giratorio al menos trimestralmente para evitar que se conviertan en una fuente de calor por fricción;
- e) lubricar los cojinetes y el equipo giratorio (ventiladores, compresores, equipo de reducción de tamaño) de acuerdo con las directrices del fabricante o como mínimo trimestralmente;
- f) eliminar el polvo acumulado en los cojinetes y componentes de los equipos giratorios para garantizar que se mueven libremente y evitar el calentamiento por fricción, como mínimo trimestralmente;
- g) designar responsabilidades y llevar un registro riguroso.

2.1.7 Asegúrese de que existe un programa exhaustivo de concienciación sobre explosiones e incendios de polvo en todas las instalaciones donde exista polvo combustible, ya sea dentro de sistemas de procesamiento cerrados o como polvo fugitivo en el interior de los edificios. Este programa debe incluir lo siguiente:

- a) formación básica para promover la concienciación y comprensión de los riesgos asociados al polvo combustible;
- b) formación de nuevos empleados sobre los riesgos específicos y las precauciones pertinentes para sus departamentos;
- c) formación, prácticas y familiarización como mínimo anuales del parque de bomberos local y los equipos internos de extinción de incendios;
- d) formación periódica de actualización para todo el personal de las instalaciones.

2.1.8 Controle estrictamente las posibles fuentes de ignición de polvo donde pueda haber presencia de polvo combustible.

- a) Asegúrese de que todos los equipos eléctricos están clasificados conforme a los artículos 500, 502 y 506 de la norma NFPA 70, el *Código Eléctrico Nacional*, como equipos de clase II, división 1 o 2, o zona 20, 21 o 22, según corresponda, o el equivalente internacional. (Consulte la ficha técnica 5-1, *Electrical Equipment in Hazardous Locations*, para obtener más información sobre la clasificación de zonas y la selección de equipos).
- b) Utilice un sistema de permisos de trabajo en caliente para administrar todas las operaciones de trabajo en caliente. (Consulte la ficha técnica 10-3, *Gestión de trabajos en caliente*).
- c) Prohíba fumar y encender fuego.

d) Proporcione la puesta a tierra y conexión equipotencial de los componentes metálicos con un valor de resistencia a tierra inferior a $1 \times 10^6 \Omega$. (Consulte la ficha técnica 5-8, *Static Electricity*). Al menos una vez al año, compruebe la continuidad de los componentes metálicos y la seguridad de las conexiones equipotenciales.

2.1.9 Prohíba el reciclaje del escape del separador de partículas y aire en edificios o salas, a no ser que se cumpla la condición «a» o todas las condiciones desde la «b» a la «h»:

- a) El conducto de aire de retorno debe descargarse en una zona que no contenga polvo fugitivo, equipos combustibles o mercancías almacenadas, materiales de construcción combustibles, equipos de alto valor o equipos importantes para la producción, O BIEN
- b) Instale un filtro a continuación de los separadores de polvo/aire que evite que el polvo vuelva al cerramiento, con una eficiencia mínima del 99,9 % a 10 micras.
- c) Instale un dispositivo para medir la pérdida de carga en el filtro con una alarma que indique cuándo se debe limpiar o sustituir el filtro.
- d) Proporcione soporte para el filtro con una tela metálica u otro método que permita que el filtro aguante una presión igual o superior al valor de P_{red} para la pieza del equipo que se encuentre inmediatamente antes de este.
- e) Instale un sistema de aislamiento de explosiones entre el edificio y el último colector de polvo del sistema (el más alejado).
- f) Al activar el sistema de aislamiento de explosiones, apague todos los equipos colectores de polvo conectados.
- g) No hay vapores, gases o mezclas híbridas inflamables implicados.
- h) El sistema colector de polvo cumple los requisitos de protección de otras secciones de esta ficha técnica.

Si se cumplen estas características, el reciclaje del escape del separador de partículas y aire no implicaría la necesidad de que el edificio/sala requiriese características de protección contra explosiones, como sistemas de venteo, entre otros (no obstante, podrían darse otros factores en el edificio o la sala que conllevasen esta necesidad).

2.2 Riesgos de explosión en salas/edificios

2.2.1 Construcción y ubicación

Aísle las zonas en que se manipule polvo combustible de otras actividades que impliquen menor riesgo separándolas con materiales de construcción o distanciando unas de otras para minimizar los daños causados por una posible explosión o un incendio. Las zonas que requieren aislamiento serían aquellas en las que el polvo fugitivo no se controle fácilmente, por ejemplo, zonas de molienda, lijado, serrado, cintas transportadoras abiertas o llenado de contenedores abiertos. Quedarían excluidas, por ejemplo, las salas que contengan colectores de polvo debidamente venteados, secadores por atomización, secadores de lecho fluido, etc.

En nuevas construcciones donde quepa la posibilidad de que se produzca polvo fugitivo, la implementación de más elementos de venteo de explosión que los calculados mediante DustCalc puede proporcionar mayor flexibilidad para eventuales cambios en procesos o materiales, a menudo con un coste adicional mínimo.

2.2.1.1 Aísle las zonas donde se manipule polvo combustible siguiendo los métodos indicados a continuación en orden de preferencia (consulte también la figura 1, tabla 1):

- a) Ubicación exterior separada al menos 15 m (50 ft) de un edificio o instalación importante (figura 1, ubicación 1).
- b) A lo largo de una pared exterior de un edificio importante, preferiblemente en una esquina para limitar la exposición (figura 1, ubicación 2).
- c) En la primera planta de un edificio importante, ya sea en una esquina exterior o en una pared exterior. Evite ubicar estas zonas en los pisos superiores de edificios de varias plantas. Si es inevitable ubicarlas por encima del nivel del suelo, asegúrese de que el suelo y el techo de la sala tengan la misma resistencia a la presión que las paredes (figura 1, ubicaciones 3 y 4).

Si se confirma con el software DustCalc, se puede reducir la separación a una distancia inferior a la recomendada en el punto «a» anterior o la distancia X de la tabla 1.

2.2.1.2 Evite ubicaciones por debajo del nivel del suelo que no puedan equiparse con paneles de venteo de explosión adecuados.

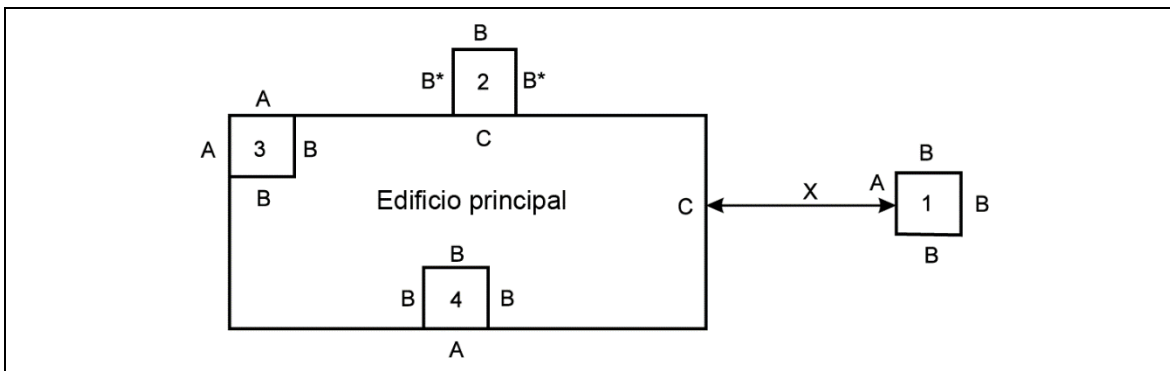


Figura 1. Ubicaciones recomendadas para procesos o equipos de manipulación de polvo combustible

Tabla 1. Construcción para actividades de manipulación de polvo

Ubicación	Distancia X, m (ft)	Construcción de la sala/edificio			Construcción de pared expuesta C	
		A	B	Cubierta		
1 (nota 3)	> 15 (50)	VP	VP	VP o LG	Cualquiera	
	3-15 (10-50)	RP	VP	VP o LG	Cualquiera	
	< 3 (10)	RP	VP	VP o LG	RP para 3 m (10 ft), horizontal y verticalmente más allá de la estructura de exposición	
2	Colindante	N/A	B	B*	VP o LG	RP para 3 m (10 ft), horizontal y verticalmente más allá de la estructura colindante
			VP	VP		
	Colindante	N/A	B	B*	RP	RP para 3 m (10 ft), horizontalmente más allá de la estructura colindante
			VP	VP		
	Colindante	N/A	B	B*	RP	RP solo para la pared colindante
			VP	RP		
3 (nota 5)	Interior	VP	RP	RP	N/A	
4 (nota 5)	Interior	VP	RP	RP	N/A	

1. Esta tabla hace referencia únicamente a la protección contra riesgos de explosión.
2. Los tipos de construcción se definen de la siguiente manera:
 RP = Resistente a la presión
 VP = Venteo de presión
 LG = Ligero, no combustible
3. Si se confirma mediante los cálculos del software DustCalc, la distancia X de la ubicación 1 puede ser inferior a la indicada anteriormente.
4. La construcción RP también es necesaria para suelos y techos que tengan espacios por debajo o por encima en los que se realicen actividades de menor riesgo.
5. En los casos en que puedan proporcionarse sistemas de venteo adecuados utilizando solamente las paredes, las cubiertas (no los techos) no necesitarán sistemas de venteo de presión.

2.2.1.3 Construya con materiales no combustibles o de tipo 1 homologados por FM aquellos edificios que presenten riesgo de explosión de polvo combustible.

2.2.1.4 Asegúrese de que las barreras físicas que aíslan las zonas de riesgo por polvo son herméticas al polvo y se componen de materiales no combustibles. Si las barreras tienen una resistencia al fuego certificada, asegúrese de que el sellado también tiene la misma clasificación.

2.2.1.5 Utilice juntas en puertas y ventanas, presurización positiva de la sala, etc., para evitar que entre polvo y se acumule en las zonas adyacentes que no tengan sus propias fuentes de polvo fugitivo.

2.2.1.6 Asegúrese de que las barreras físicas que aíslan las zonas de riesgo por polvo son suficientemente resistentes a las explosiones para evitar que fallen antes de que la presión llegue a ventearse de forma segura.

2.2.1.7 No habilite aberturas en paredes resistentes a explosiones. Si las aberturas son imprescindibles, asegúrese de que las puertas de estas paredes se mantienen normalmente cerradas y de que tienen la misma resistencia a explosiones que las paredes (consulte la ficha técnica 1-44, *Damage-Limiting Construction*, para obtener información sobre el diseño y la instalación de puertas y ventanas resistentes a explosiones).

2.2.1.8 Instale sistemas de resistencia a la presión y habilite superficies de venteo conforme a los cálculos realizados con el software DustCalc de FM Global.

2.2.1.9 En edificios donde haya probabilidad de que se produzca polvo fugitivo a pesar del diseño de procesos y el mantenimiento de equipos, provea el edificio de elementos y equipos que disminuyan esta probabilidad, así como la cantidad de polvo acumulado, mediante todas o alguna de las medidas siguientes, según corresponda:

- a) Las paredes interiores deben ser lisas y con la menor cantidad posible de salientes.
- b) En la medida de lo posible, instale una cubierta inclinada y lisa sobre la parte superior de los elementos que tengan superficies horizontales, como viguetas, vigas y cornisas con el fin de que se desprenda el polvo asentado del aire.
- c) Dichas cubiertas deben tener una pendiente mínima de 60° con respecto a la horizontal, a menos que se haya confirmado que es suficiente una pendiente menor.
- d) La estructura superior del edificio debe ser de acero estructural, fuera del alcance de operaciones ordinarias de aspiración o barrido, y se deben utilizar salientes horizontales (como vigas o canales en forma de U en posición vertical o lateral) de materiales no combustibles para evitar que se formen cavidades donde pueda acumularse el polvo.

2.2.2 Actividad

2.2.2.1 Puede considerarse que los edificios están libres de riesgo de explosión de polvo combustible si contienen equipos de manipulación de polvo combustible diseñados y protegidos para controlar o ventear de forma segura una explosión en interiores, de acuerdo con las secciones pertinentes de esta ficha técnica.

2.2.2.2 Tome todas o algunas de las siguientes medidas, según sea necesario, en operaciones nuevas en que pueda preverse cierta cantidad de polvo fugitivo o en operaciones existentes en las que esta cantidad sea excesiva:

- a) Inspeccione el equipo de proceso para identificar las fuentes de liberación de polvo.
- b) Modifique, repare o sustituya el equipo para eliminar o al menos reducir el escape de polvo.
- c) Proporcione puntos receptores por vacío permanentes en las ubicaciones en que se libere polvo, como zonas de molienda, pulido, esmerilado, vaciado de sacos, puntos de transferencia abiertos en sistemas de transporte, y en otros equipos o ubicaciones donde se liberen grandes cantidades de polvo con frecuencia. En algunos casos, esto puede requerir la construcción de una cubierta ventilada o un cerramiento de contención para el equipo existente.
- d) Utilice sistemas de manipulación de polvo cerrados con una ligera presión negativa para reducir los escapes de polvo.
- e) Deben llevarse a cabo tareas de orden y limpieza adicionales en las operaciones existentes mientras se realizan modificaciones en los equipos (consulte la sección 2.2.4).

2.2.2.3 En los edificios existentes donde haya pequeñas cantidades puntuales (menos del 5 % de la superficie del edificio y, en ningún caso, más de 93 m² [1.000 ft²]) de polvo combustible fugitivo presente, se puede tolerar la ausencia de elementos de construcción que limiten los daños por explosión, si se dan las siguientes condiciones:

- a) La tasa de acumulación y escape de polvo fugitivo es muy baja, es decir, inferior a 2 mm (1/16 in) para un polvo con una densidad aparente de aproximadamente 580 kg/m³ (36 lb/ft³) durante un periodo de tres meses.
- b) La frecuencia de limpieza es suficientemente alta, aunque no se realizara una limpieza programada, como para que las acumulaciones de polvo no lleguen a alcanzar el nivel inaceptable de 2 mm (1/16 in) mencionado anteriormente.

2.2.3 Protección

2.2.3.1 Construya paredes resistentes y que alivien la presión de acuerdo con la ficha técnica 1-44, *Damage-Limiting Construction*.

- a) Diseñe los sistemas de alivio de presión de los paneles de venteo de explosión (P_{stat}) con la presión más baja que permita el diseño de resistencia al viento. En zonas con poco viento, el valor de P_{stat} puede ser de hasta 10 mbar (20 psf), mientras que en zonas con más viento, es más frecuente que este valor sea de 15 mbar (30-40 psf).
- b) Instale sistemas de resistencia a la presión y habilite superficies de venteo conforme a los cálculos realizados con el software DustCalc de FM Global.

2.2.3.2 No utilice paneles de venteo de explosión en la cubierta para aliviar explosiones.

2.2.3.3 Si se demuestra mediante un estudio detallado de ingeniería que las paredes con paneles de venteo de explosión no pueden proporcionar por sí solas la superficie de venteo necesaria para explosiones, es posible utilizar paneles de venteo en la cubierta para proporcionar una parte de la superficie de venteo necesaria, siempre que no pueda acumularse hielo o nieve en el venteo. Cualquiera de los siguientes métodos es aceptable:

- a) Coloque los paneles de venteo de explosión en un ángulo mínimo de 60°, ya sea en una cubierta con ese ángulo de inclinación o como proyección por encima del perfil de cubierta (consulte la figura 2). En el caso de los paneles de venteo proyectados por encima del perfil de cubierta, la superficie de venteo efectiva que se debe utilizar en el cálculo de tamaño de los paneles de venteo es la sección transversal más pequeña por la que tendrían que pasar los gases de combustión.
- b) Instale un sistema de calorifugación que abarque el perímetro y la superficie del venteo de explosión.
1. Deje activado el sistema de calorifugación permanentemente o active automáticamente el sistema cuando la temperatura exterior descienda a 0 °C (32 °F) o menos.
 2. Asegúrese de que el cableado del sistema de calorifugación tiene suficiente holgura para poder instalar el panel de venteo de explosión de la forma prevista.
 3. Utilice un equipo de calorifugación homologado por FM.
- c) Instale paneles de venteo de explosión sin aislamiento para permitir que el calor del edificio derrita la nieve o el hielo. Debe prever la condensación bajo el venteo de explosión y tomar medidas para asegurarse de que esta no cause problemas.

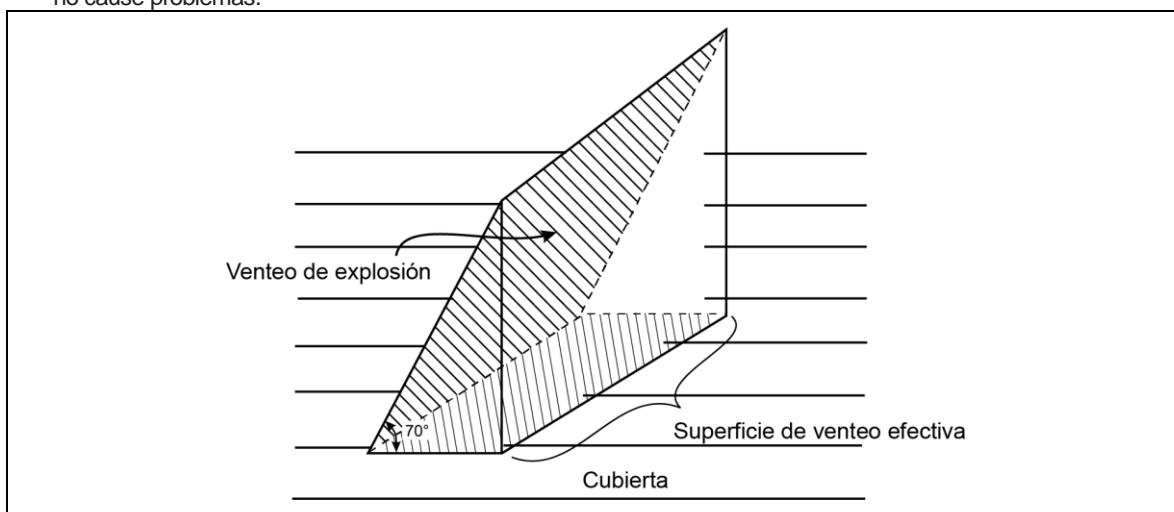


Figura 2. Esquema de paneles de venteo de explosión de techo que sobresalen por encima del perfil de cubierta

2.2.3.4 En los casos en que los dispositivos de venteo de explosión se abran hacia fuera en lugar de romperse, utilice dispositivos mecánicos o de gravedad para asegurarse de que no se pueden volver a cerrar (3.1.9).

2.2.3.5 Para evitar la liberación no controlada de los paneles de venteo de explosión y se cree por tanto el riesgo de que estos puedan causar daños al caer, siga estos criterios:

- a) Utilice cables de seguridad para limitar el movimiento de los paneles de venteo.
- b) Conecte los cables de seguridad a no más de dos esquinas, asegurándose de que las esquinas ancladas sean adyacentes.
- c) Para evitar que los paneles anclados vuelvan a cerrarse sobre la abertura del venteo después de una explosión, fije la parte lateral o inferior del panel en lugar de la parte superior. De este modo, los paneles se apartarán completamente de la abertura de venteo, lo que dejará libre el paso sin obstáculos para que los gases de combustión fluyan durante la explosión y para que el aire fresco entre en el cerramiento protegido después de la explosión.
- d) Establezca la longitud de anclaje mínima conforme a la siguiente ecuación:

$$l \geq \frac{a \times b}{2 \times (a+b)}$$

donde:

l = longitud de los cables de seguridad

a, b = dimensiones laterales del venteo de explosión

e) Si la longitud del cable de seguridad es inferior a la determinada anteriormente, considere el venteo de explosión como un panel abisagrado a la hora de calcular la superficie de venteo y la presión de explosión venteada (P_{red}). De este modo, se compensará el obstáculo para el proceso de venteo que suponen los cables más cortos.

f) Se considera aceptable que los cables se coloquen en las cuatro esquinas siempre que la longitud de estos supere el mínimo establecido en d (arriba). Si la longitud es inferior, la superficie de venteo se verá limitada al espacio anular determinado por la longitud del cable y las dimensiones del panel, en lugar de por el tamaño del propio panel.

2.2.3.6 No conecte tuberías del sistema de rociadores a ninguna pared, techo o cubierta que pueda ser desplazado por la presión creada en una sala o un edificio como consecuencia de una explosión.

2.2.4 Operación y mantenimiento

2.2.4.1 En edificios en los que se libere polvo fugitivo a pesar del diseño de procesos y el mantenimiento de equipos, incorpore las siguientes acciones a un programa de control de polvo fugitivo:

- a) Designe responsabilidades y lleve un registro.
- b) Dedique el tiempo y los recursos necesarios con regularidad.
- c) Cree un programa de mantenimiento y revíselo periódicamente para asegurarse de que es adecuado.
- d) Preste especial atención a eliminar las acumulaciones por encima del nivel del suelo, como por ejemplo en la parte superior de los equipos y en los elementos estructurales de los edificios, ya que es más probable que, si se agita, este polvo quede suspendido en el aire y forme una nube explosiva.
- e) En la medida de lo posible, debería eliminarse el polvo por aspiración mediante un sistema de vacío central, portátil o montado sobre camión, en función de lo que sea más adecuado.
- f) En caso de que aspirar no resulte práctico, también sería aceptable barrer o lavarlo con agua.
- g) Si la purga de aire comprimido es el único método práctico de limpieza, tome las siguientes precauciones:
 1. Realice una purga de aire con la frecuencia suficiente para evitar acumulaciones de polvo peligrosas.
 2. La purga debe realizarse en pocas zonas de tamaño reducido a la vez con un volumen y una presión de aire lo más bajos posible.
 3. Apague el equipo eléctrico que no sea adecuado para ubicaciones peligrosas de clase II, división 2.
 4. Prohíba las llamas expuestas y el trabajo en caliente, y asegúrese de que no existen superficies calientes.

2.2.4.2 Cualquier acumulación de polvo fugitivo supone un riesgo de explosión secundaria y debe eliminarse en edificios cuya construcción no sea de limitación de daños (CLD) y controlarse en los edificios con CLD (3.1.1).

- a) La frecuencia de limpieza del polvo debe establecerse de tal manera que no lleguen a producirse acumulaciones de más de 2 mm ($1/16$ in) en más del 5 % de la superficie del suelo de la sala.
- b) Las acumulaciones de polvo fugitivo en cantidades que superen lo anterior, ya sea en grosor o superficie, serán el indicativo de que debe iniciarse la limpieza.
- c) Asegúrese de que la superficie total de acumulación no supera los 93 m² (1.000 ft²).
- d) El grosor de 2 mm ($1/16$ in) se basa en el polvo generado habitualmente en actividades agrícolas o madereras con una densidad aparente de aproximadamente 580 kg/m³ (36lb/ft³). El grosor del polvo de distinta densidad se puede extrapolar de las densidades aparentes.

2.2.4.3 Inspeccione periódicamente los dispositivos de venteo de explosión para evitar que su estado o movilidad se vean afectados. Entre las posibles deficiencias de estos dispositivos se incluyen las siguientes:

- a) corrosión;
- b) pintado inadecuado de piezas móviles o membranas de rotura;
- c) congelación;
- d) acumulación de nieve sobre los paneles de venteo o delante de estos;
- e) obstáculo por tuberías, cables u otras herramientas;
- f) equipo permanente o temporal situado junto al dispositivo de venteo.

Cualquiera de estas deficiencias puede aumentar la presión de alivio de venteo (P_{stat}) efectiva y provocar que las paredes resistentes a explosiones fallen y dañen la estructura del edificio durante una explosión.

2.3 Riesgos de explosión del equipo

2.3.1 Información general

2.3.1.1 Siempre que sea posible, ubique todos los equipos que supongan riesgo de explosión al aire libre (3.1.2).

2.3.1.2 Si el equipo conlleva algún riesgo de explosión, aplique los siguientes criterios:

- a) Elimine los riesgos de explosión mediante cualquiera de las técnicas detalladas en la sección 2.3.2. O BIEN,
- b) Mitigue el riesgo de explosión mediante dispositivos de venteo, supresión o contención de explosiones o mediante sistemas de aspiración, o bien utilice una combinación adecuada de todos estos sistemas, tal como se detalla en la sección 2.3.3.

2.3.2 Prevención de riesgos explosión

2.3.2.1 Si el equipo utilizado manipula materiales gruesos, evite que se genere polvo durante la manipulación del material mediante la aplicación de métodos adecuados o limpie previamente el material grueso para eliminar todas las partículas de la mayoría de los equipos de proceso.

2.3.2.2 Si el equipo utilizado manipula materiales gruesos, evite que se genere polvo durante la manipulación del material eliminando el polvo del aire dentro del equipo de proceso mediante un líquido nebulizado (agua u otro líquido compatible) como se indica a continuación:

- a) Aplique el agente supresor líquido en un punto del proceso donde se produzca una turbulencia considerable, por ejemplo, en una boquilla de descarga, para garantizar que el agente supresor se mezcle completamente con el flujo de material.
- b) Si el sistema de nebulización de agente supresor es el único medio existente de control de riesgos, instale un sistema de enclavamiento que detenga el flujo de proceso de sólidos en caso de que dicho sistema de supresión no funcione correctamente.
- c) Confirme la eficiencia del sistema para eliminar el polvo del equipo. Para ello, compruebe visualmente el equipo mientras está en funcionamiento, por ejemplo, abriendo los orificios de acceso o revisión.
- d) Desarrolle un programa de mantenimiento e inspección con procedimientos escritos y registros de cumplimiento para garantizar que el sistema de nebulización del agente supresor de polvo funciona correctamente siempre que se manipula el flujo de proceso de sólidos.

2.3.2.3 Inertice el polvo combustible mezclándolo con un polvo no combustible (proceso denominado «flegmatización»), según lo siguiente (3.1.3):

- a) Realice una prueba para confirmar que la mezcla no es explosiva, de conformidad con las normas ASTM E1226, EN 14034-1 y 2 u otro equivalente internacional.
- b) Asegúrese de que el polvo no combustible no se separa del polvo combustible durante la manipulación de materiales.

2.3.2.4 Reduzca el nivel de oxígeno del proceso con un gas inerte de acuerdo con las recomendaciones de la ficha técnica 7-59, *Inerting and Purging of Equipment*.

2.3.2.4.1 Si los valores de concentración límite de oxígeno (CLO) del material específico que se está manipulando no están disponibles en la ficha técnica 7-59, organice pruebas de laboratorio de los materiales para determinarlo.

2.3.2.4.2 Si se va a utilizar una atmósfera inerte para proteger el transporte neumático de polvo metálico ligero recién molido o fabricado (aluminio, magnesio, titanio, circonio):

- a) Asegúrese de que la concentración mínima de oxígeno es de al menos un 1 % para garantizar que se puede formar una capa estable de óxido para pasivar el polvo.
- b) Si el polvo metálico no se va a exponer al aire o si las pruebas han demostrado que es aceptable un nivel de oxígeno inferior, las concentraciones inferiores al 1 % serán tolerables.

2.3.2.4.3 El polvo metálico de titanio, magnesio, circonio, uranio y torio se inflama en dióxido de carbono puro. Para los procesos de inertización en que se manipulan estos materiales, utilice argón, helio o nitrógeno (excepto para el titanio, que se puede inflamar en nitrógeno puro)

2.3.2.5 Como alternativa a una atmósfera inerte para manipular polvo metálico ligero recién fabricado (aluminio, magnesio, titanio, circonio), siga estos pasos:

- a) Utilice colectores húmedos (lavado con agua) en lugar de colectores de tipo seco.
- b) Antes de apagar el sistema colector, retire el lodo acumulado y deséchelo de forma segura.
- c) Mantenga en funcionamiento la ventilación del colector ininterrumpidamente hasta que el lodo metálico/de agua se elimine del colector.

El aluminio tiene una energía mínima de ignición (EMI) muy baja (de solo 0,1 mJ), lo que lo hace fácilmente inflamable, y el polvo metálico en general pueden tener un valor de K_{st} alto y dificultar un venteo de explosión adecuado. Al humedecer el polvo de aluminio con agua, se pueden formar pequeñas cantidades de hidrógeno, por lo que debe mantenerse húmedo en todo momento.

2.3.3 Mitigación de riesgos de explosión

2.3.3.1 Venteo

2.3.3.1.1 Habilite una superficie de venteo de acuerdo con los cálculos realizados con el software DustCalc de FM Global (3.1.4).

2.3.3.1.2 En los casos en los que los equipos interiores con riesgo de explosión no se puedan reubicar en el exterior, proporcione venteo de explosión de una de las siguientes formas:

- a) Coloque el recipiente junto a una pared exterior y ventile la explosión hacia el exterior a través de un conducto de ventilación corto.
- b) Ventile la explosión a la zona circundante a través de un dispositivo de venteo sin llama homologado por FM. Dicha zona deberá estar libre de polvo fugitivo (3.1.5).
 1. Será necesario aumentar la superficie de venteo (con respecto a un venteo abierto o sin obstáculos) para adaptarse a la reducida eficiencia de ventilación causada por el dispositivo de venteo sin llama.
 2. Utilice la eficiencia de venteo para dispositivos de venteo sin llama homologados por FM, tal como se indica en la Guía de productos homologados por FM, una publicación de FM Approvals.

Si lo anterior no resulta práctico, aplique otros métodos de mitigación de riesgos de explosión descritos en el apartado 2.3.1.2.b.

2.3.3.1.3 Para calcular una superficie de venteo para la que no se dispongan de datos de resistencia de diseño del equipo, utilice los siguientes valores de P_{red} (presión máxima admisible) para equipos de construcción ordinaria, teniendo en cuenta que pueden producirse deformaciones del recipiente en una explosión venteadada de forma segura:

- a) recipientes rectangulares frágiles (por ejemplo, colector de polvo con filtros de mangas) : 0,2 bar man. (2,9 psig)
- b) recipientes cilíndricos (por ejemplo, ciclón) o recipientes rectangulares resistentes (reforzados): 0,3 bar man. (4,4 psig) (3.1.6)

2.3.3.1.3.1 Para los recipientes en los que la deformación no sea aceptable, determine la resistencia de diseño del equipo o suponga la mitad de los valores indicados anteriormente para P_{red} .

2.3.3.1.4 Ajuste la presión de alivio de venteo de explosión (P_{stat}) en el valor más bajo posible de acuerdo con uno de los siguientes criterios:

- a) No debe ser superior a 50 mbar man. (0,7 psig) si el recipiente funciona por debajo de esta presión.
- b) Debe ser al menos 0,1 bar man. (1,4 psig) inferior a la presión P_{red} asumida para una presión de funcionamiento más alta.

2.3.3.1.5 Para calcular una superficie de venteo para la que haya datos de resistencia de diseño del equipo disponibles, establezca el valor de P_{red} según los siguientes criterios:

- a) Si la deformación del recipiente es aceptable, utilice un valor equivalente al doble de la resistencia de diseño.
- b) Si debe evitarse la deformación del recipiente, utilice un valor equivalente a la resistencia de diseño (3.1.6).

2.3.3.1.6 Construya los paneles de venteo de explosión utilizando un material lo más ligero posible (masa por unidad de superficie) para minimizar la superficie de venteo necesaria. Los paneles de venteo de explosión que son membranas de rotura (por ejemplo, discos de rotura prefabricados, papel de aluminio, etc.) prácticamente no tienen inercia y no requieren ningún ajuste en la superficie de venteo de explosión requerida (3.1.7).

2.3.3.1.6.1 Si los dispositivos de venteo son más pesados que las membranas ligeras, calcule el efecto en la superficie de venteo con el software DustCalc de FM Global.

2.3.3.1.7 Instale conductos de venteo que redirijan los productos de combustión del conducto de venteo a una zona segura de acuerdo con lo siguiente:

- a) Dirija el conducto de venteo hacia una zona exterior segura.
- b) No permita la instalación de codos en el conducto.
- c) Limite la relación longitud/diámetro (L/D*) del conducto a 1.
- d) Asegúrese de que el conducto de venteo tiene, como mínimo, la misma resistencia que la P_{red} de diseño del recipiente.
- e) No permita la instalación de cerramientos en el extremo de descarga del conducto que impidan el venteo sin obstáculos del material descargado.
- f) Si no se cumplen las condiciones anteriores, cuantifique los efectos en la superficie de venteo mediante el software DustCalc de FM Global (3.1.8).

*Calcule el diámetro equivalente (D_{eff}) de un conducto no circular de la siguiente manera:

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4A_d}{\pi}}$$

donde A_d es la sección transversal del conducto (m^2 o ft^2)

2.3.3.1.8 Si se va a colocar una tela metálica o va a haber cualquier otro obstáculo entre un panel de venteo de explosión y la atmósfera libre, ajuste la superficie de venteo de explosión efectiva para compensar esta disminución de la capacidad de venteo de la siguiente manera:

- a) Si la tela o el obstáculo ocupa menos del 15 % de la superficie de venteo de explosión, no es necesario realizar ningún ajuste.
- b) Si la tela o el obstáculo ocupa entre el 15 % y el 40 % de la superficie de venteo de explosión, calcule la superficie de venteo de explosión efectiva de la siguiente forma:

$$A_{v,eff} = A_{v,actual} \times \frac{115 - \% \text{ bloqueado}}{100}$$

- c) Si la tela o el obstáculo supera el 40 % de la superficie de venteo de explosión, la obstrucción es excesiva. Sustituya la tela o el objeto que obstruya la zona por otro elemento que constituya una obstrucción menor.

2.3.3.1.9 En los casos en que los dispositivos de venteo de explosión están diseñados para apartarse de la abertura en lugar de romperse, utilice dispositivos mecánicos o de gravedad para garantizar que no pueden volver a cerrarse sobre la abertura y crear una presión negativa que provoque el colapso o la implosión del equipo protegido (3.1.9).

2.3.3.1.9.1 Si existe la posibilidad de que los venteos de explosión se vuelvan a cerrar y no hay otras aberturas que puedan aspirar el aire, instale válvulas de seguridad rompedoras de vacío (consulte la norma técnica alemana VDI 3673 para obtener información sobre el tamaño).

2.3.3.1.10 Para evitar que los paneles de venteo de explosión puedan salir proyectados y causar daños instale cables de retención según lo indicado en la sección 2.2.3.5.

2.3.3.1.11 No coloque objetos con riesgo de incendio o de daños por presión en la trayectoria de los venteos de explosión (3.1.10.1 y 3.1.10.2).

2.3.3.1.12 En instalaciones nuevas, deje una distancia equivalente a al menos dos veces el diámetro del venteo de explosión entre una salida de venteo de explosión (parte frontal del venteo de explosión o conducto de venteo) y cualquier obstáculo fijo, plano y de gran tamaño (por ejemplo, una pared). En el caso de las salidas de venteo de explosión con sección transversal no circulares, utilice el diámetro hidráulico, que se calcula de la siguiente forma (3.1.11):

Diámetro hidráulico = $4A/p$, donde

A = sección transversal del venteo
 p = perímetro de la sección transversal

2.3.3.1.13 Si se instala una cubierta de protección contra la intemperie (por ejemplo, una cubierta para la lluvia) en el extremo de un conducto de venteo de explosión, calcule el efecto sobre su eficacia de venteo de la siguiente manera:

- a) Si hay una distancia equivalente, como mínimo, al diámetro del venteo de explosión entre el extremo del conducto y la cubierta de protección contra la intemperie, la eficiencia no se verá afectada.
- b) Si la distancia es de entre $\frac{1}{4}$ y 1 vez el diámetro del venteo de explosión, considere la cubierta de protección como una curva de 90° en el flujo venteado al calcular el efecto del conducto de venteo.
- c) Una distancia desde el conducto de venteo inferior a $\frac{1}{4}$ del diámetro del venteo de explosión no es aceptable a menos que esté diseñado para salir despedido en caso de explosión.

Para conductos no circulares, utilice el diámetro hidráulico para estos cálculos (2.3.3.1.12).

2.3.3.1.14 No instale venteos de explosión si el polvo (o sus productos de combustión) es tóxico, radiactivo o corrosivo para los equipos o estructuras cercanos o si, por cualquier otro motivo, no es conveniente liberarlo(s) de un sistema cerrado. Utilice alternativas al venteo, por ejemplo, sistemas de prevención de riesgos de explosión, dispositivos de supresión o contención de explosiones, o sistemas de operación de alto vacío.

2.3.3.1.15 Si un recipiente que requiere venteos de explosión tiene obstáculos importantes que impiden que los gases fluyan libremente, instale varios paneles de venteo distribuidos por diferentes lugares del recipiente en lugar de un panel de venteo grande de la misma superficie total (3.1.12).

2.3.3.1.16 Si un recipiente contiene polvo combustible en suspensión y vapores de líquidos que arden o gases inflamables (una mezcla híbrida), la reactividad de la mezcla requerirá superficies de venteo mayores que si contuviese únicamente polvo combustible.

- a) La presencia de vapor o gas inflamable puede despreciarse si la concentración equivale al 5 % o menos de su límite inferior de explosividad (LIE).
- b) Si la concentración de gas supera el 5 % de su LIE, debe determinarse la reactividad de la mezcla mediante una prueba.

2.3.3.1.17 La superficie de venteo de explosión necesaria para un recipiente que presente riesgo de explosión de polvo y que funcione a presiones superiores a 0,1 bar man. (1,5 psig) debe estudiarse y analizarse cuidadosamente. El software DustCalc de FM Global admite una presión inicial de hasta 4 bar man. (58 psig) para explosiones de gran magnitud.

- a) Ajuste la presión de alivio de venteo, P_{stat} a 0,1 bar man. (1,5 psig) como mínimo por encima de la presión operativa máxima ordinaria (3.1.13).
- b) Infórmese sobre los criterios de dimensionamiento de venteos de explosión a través de expertos familiarizados con el venteo de alta presión inicial.

2.3.3.1.18 Las fuerzas de retroceso derivadas del venteo de una explosión pueden llegar a descolocar incluso recipientes de gran tamaño que no estén correctamente anclados. Aplique una de las siguientes medidas para controlar las fuerzas de retroceso:

- a) Instale venteos de igual tamaño en los lados opuestos del recipiente.
- b) Calcule la magnitud y la duración de la fuerza de retroceso dinámica (o una fuerza estática equivalente) de un venteo y áncelo para resistir dichas fuerzas (3.1.10.3).

2.3.3.2 Aislamiento

Evite conectar entre sí diferentes equipos que supongan un riesgo de explosión de polvo. Un equipo correctamente protegido puede fallar si una explosión se propaga desde otro equipo. Los sistemas de aislamiento pueden evitar esa situación (3.1.14).

2.3.3.2.1 Instale aislamiento contra explosiones en todas las conexiones de recipientes (o grupos de recipientes) diseñados para contener la presión de explosión (diseño resistente a explosiones).

2.3.3.2.2 Instale aislamiento contra explosiones en todas las conexiones entre recipientes (o grupos de recipientes) que estén protegidos individualmente mediante venteos de explosión (u otro método de mitigación), pero que puedan sufrir daños materiales y ver interrumpido su funcionamiento como consecuencia de la propagación de una explosión.

2.3.3.2.3 Diseñe dispositivos de aislamiento mecánico en equipos diseñados para contener la explosión teniendo en cuenta la presión de diseño del recipiente y dispositivos de aislamiento en equipos protegidos mediante venteos de explosión para que puedan resistir la presión reducida de diseño (P_{red}). Entre estos dispositivos se incluyen esclusas de aire giratorias, válvulas de acción rápida, dispositivos de desviación del frente de llamas/explosiones, compuertas de escape de alta velocidad, válvulas de descarga doble y amortiguadores de retroceso.

2.3.3.2.4 Asegúrese de que los dispositivos de aislamiento activos que requieran detección para la activación mecánica del dispositivo están suficientemente separados para que el dispositivo se cierre antes de la llegada de la llama.

2.3.3.2.5 Las tuberías utilizadas para el transporte neumático de fase densa de polvo combustible no suelen presentar riesgo de propagación de explosiones. Las tuberías se pueden instalar sin dispositivos de aislamiento de explosiones siempre que el material transportado no sea ni polvo metálico ni una mezcla híbrida.

2.3.3.3 Sistemas de aislamiento

Esta sección incluye formas aceptables de aislamiento de explosiones y las características necesarias para garantizar que los sistemas actúan como barreras de resistencia eficaces ante las llamas (3.1.15).

2.3.3.3.1 Sistemas de protección contra explosiones químicas

- a) Instale el sistema de acuerdo con la ficha técnica 7-17, *Explosion Protection Systems*.
- b) Instale un equipo homologado por FM.
- c) Estos sistemas pueden ser inadecuados en las siguientes condiciones:
 1. Los flujos de proceso son altos.
 2. La explosión primaria se produce en un recipiente muy grande.
 3. La explosión primaria se produce en un recipiente protegido mediante un dispositivo de contención de explosiones.

2.3.3.3.2 Esclusas de aire giratorias

Instale los dispositivos de la forma siguiente:

- a) Asegúrese de que el ángulo entre palas contiguas y la forma de la carcasa permiten en todo momento que puedan acoplarse dos palas por lado (cerca de la pared de la carcasa).
- b) Asegúrese de que las palas (incluidas las puntas) están fabricadas en metal y tienen un grosor de al menos 3 mm ($\frac{1}{8}$ in).
- c) Asegúrese de que el espacio entre las puntas de las palas y la carcasa es de entre 0,2 y 0,25 mm (o no superior a 0,1 mm en el caso del polvo de aluminio). Consulte la referencia 17 del anexo D para obtener información adicional sobre la separación permitida.
- d) Enclave la esclusa de aire giratoria para que se detenga automáticamente en caso de explosión y evitar que pase la sustancia en combustión. No hace falta un enclavamiento si la sustancia en combustión no puede provocar un segundo incendio o una explosión de importancia.

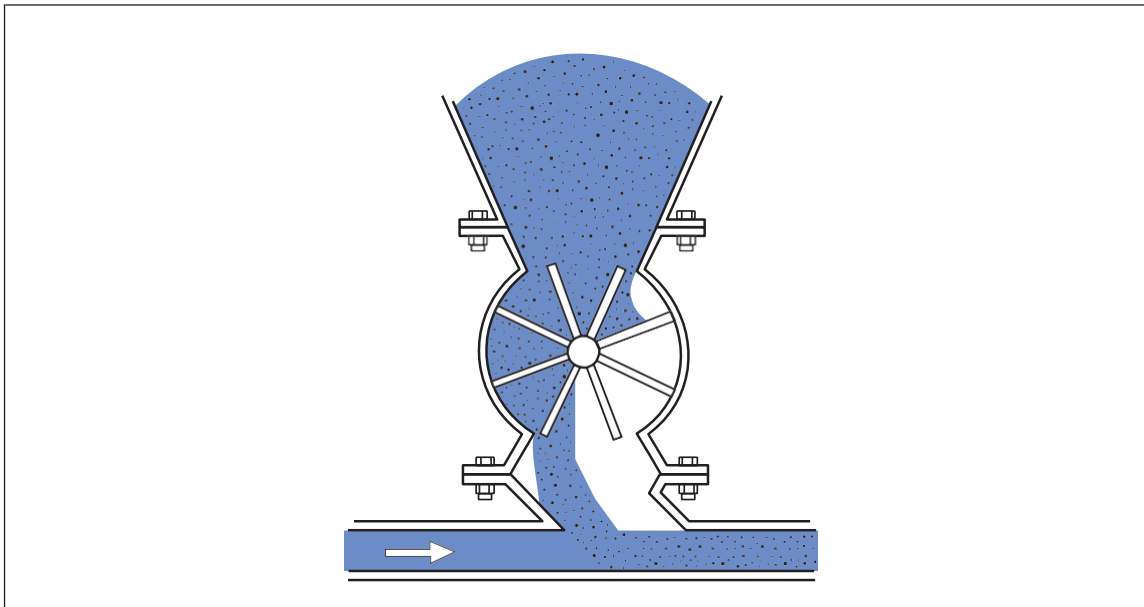


Figura 3. Esclusa de aire giratoria

2.3.3.3.3 Válvulas de acción rápida de tipo compuerta o mariposa

Asegúrese de que la distancia entre el dispositivo de detección de explosiones y la válvula de acción rápida es lo suficientemente larga como para permitir que la válvula se cierre completamente antes de la llegada del frente de llamas del polvo.



Figura 4. Válvula (de compuerta) de acción rápida

2.3.3.3.4 Válvula de acción rápida (tipo flotador) (3.1.16)

Un ejemplo de este tipo de válvula es el modelo Ventex ESI (figura 5).

- Instale la válvula a una distancia de entre 5 m y 12,5 m (16 y 41 ft) del equipo donde se pueda iniciar la explosión.
- Asegúrese de que el valor de P_{stat} (presión de alivio de venteo) para el equipo con venteo de explosión situado aguas arriba o aguas abajo de la válvula de flotador es superior a la presión diferencial necesaria para cerrar la válvula, que normalmente es de alrededor de 0,1 bar man. (1,5 psig).
- Si el valor de P_{stat} debe ser inferior a la presión diferencial requerida, instale un mecanismo de cierre alternativo habilitando un sistema de detección óptica en la fuente de explosión, que dispare la descarga de gas comprimido a alta velocidad cerca de la válvula de flotador para forzar su cierre.
- No coloque una válvula de flotador en un flujo de aire que tenga una carga significativa de polvo abrasivo, ya que desgastaría prematuramente las superficies del flotador.

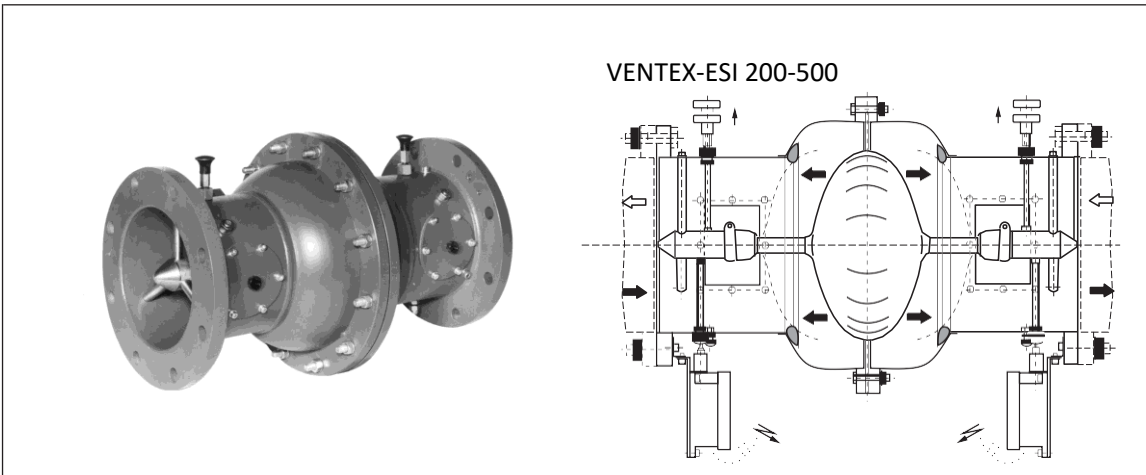


Figura 5. Válvula de flotador de acción rápida (Ventex ESI®)

2.3.3.3.5 Dispositivo de desviación del frente de llamas o explosiones

- a) No instale este dispositivo aguas arriba de un dispositivo de movimiento de aire, ya que una explosión originada aguas arriba del dispositivo de desviación se propagaría más allá de este.
- b) No utilice dispositivos de desviación de explosiones en flujos de aire que tengan una carga significativa de polvo abrasivo y que, por tanto, puedan acabar corroyendo la cubierta del dispositivo de desviación de descarga de presión.
- c) No utilice dispositivos de desviación de explosiones para mezclas híbridas en las que los vapores inflamables superen el LIE.

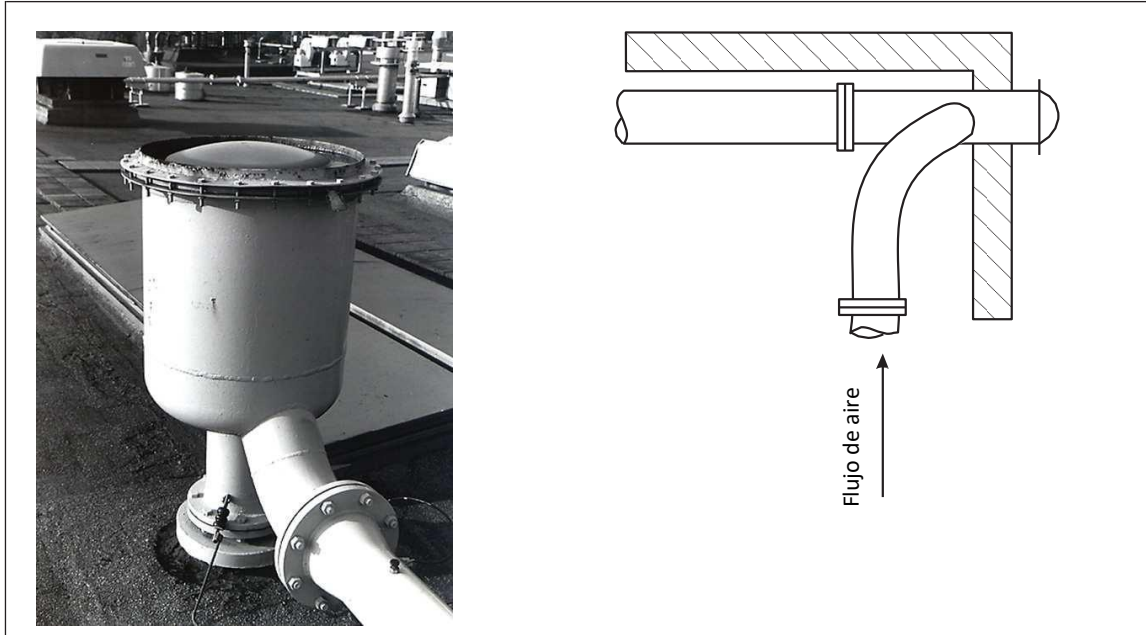


Figura 6. Dispositivo de desviación de explosiones. Figura 7. Instalación interior de dispositivo de desviación de explosiones

2.3.3.3.6 Compuerta de escape de alta velocidad

- a) Accione la compuerta de escape de alta velocidad mediante detección de presión o detección de explosión por infrarrojos en el recipiente situado aguas arriba donde podría producirse la explosión.
- b) Asegúrese de que el sistema de detección y la respuesta de la compuerta de escape son lo suficientemente rápidos como para cerrar completamente la compuerta de escape antes de que le llegue el frente de llama de polvo.
- c) Asegurarse de que el rearme de la compuerta de escape es de tipo manual. El rearme automático no es aceptable.

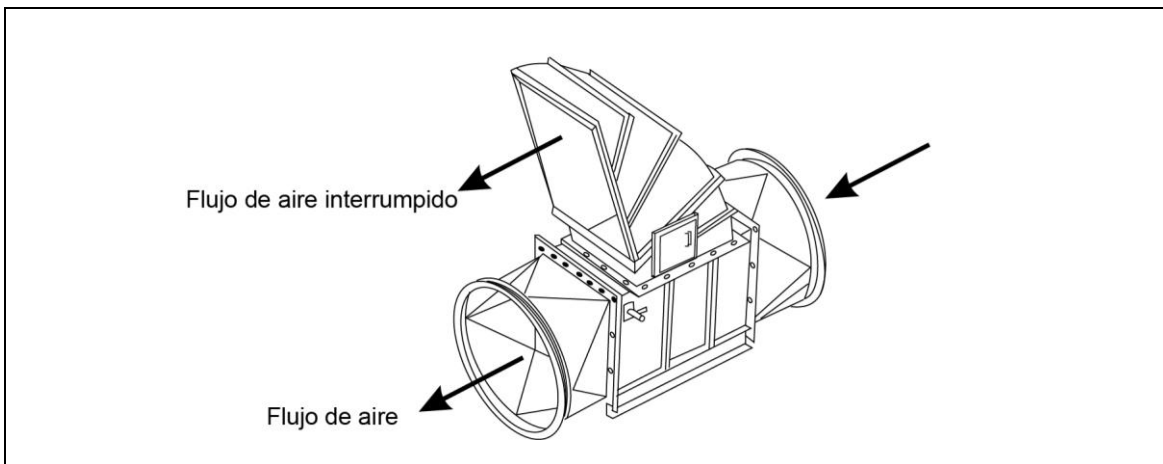


Figura 8. Compuerta de escape de alta velocidad

2.3.3.3.7 Válvula de descarga doble

Instale un enclavamiento para garantizar que no se abran ambas válvulas simultáneamente.

2.3.3.3.8 Amortiguador de retroceso

Básicamente, se trata de una válvula de retención que resulta eficaz para detener la propagación de explosiones en la dirección opuesta al flujo ordinario. Asegúrese de que el dispositivo dispone de un venteo de explosión aguas abajo del flujo ordinario del sistema.

2.3.3.4 Dispositivo de supresión

2.3.3.4.1 Si se ha elegido la supresión de explosiones como método de mitigación de riesgos de explosión:

- a) Instale sistemas de supresión de explosiones de acuerdo con la ficha técnica 7-17, *Explosion Protection Systems*.
- b) Instale un equipo homologado por FM de acuerdo con los límites de aplicación certificados.

2.3.3.5 Sistemas de contención

2.3.3.5.1 Si se ha elegido como método de mitigación de riesgos de explosión la contención de explosiones, utilice el método de diseño resistente a explosiones. Los recipientes existentes resistentes a los golpes de presión son aceptables como sistemas de contención de explosiones.

- a) Un diseño resistente a explosiones puede ser cualquier recipiente con una presión de diseño de 6 bar man. (87 psig) o más que no se deformaría por una explosión de polvo producida a una presión inicial (previa a la explosión) inferior a 0,1 bar man. (1,5 psig).
- b) Un diseño resistente a los golpes de presión puede ser cualquier recipiente con una presión de diseño de 3 bar man. (43 psig) o más diseñado de acuerdo con el Código ASME de recipientes y calderas a presión, sección VIII, o con un límite de resistencia de 6 bar man. (87 psig) o más conforme a otros códigos. Con este diseño, el recipiente puede deformarse, pero no romperse en caso de que se produzca una explosión de polvo a una presión inicial (previa a la explosión) inferior a 0,1 bar man. (1,5 psig).
- c) Para evitar daños en otros equipos conectados aguas arriba o aguas abajo de los recipientes protegidos mediante el sistema de contención de explosiones, se debe instalar un sistema de aislamiento contra explosiones.

2.3.3.6 Sistema de alto vacío (3.1.17)

2.3.3.6.1 Si se ha elegido como método de mitigación de riesgos de explosión un sistema de alto vacío, utilice los siguientes criterios:

- a) Utilice el sistema de manipulación de polvo a una presión absoluta inferior a 0,1 bar (1,5 psia).
- b) Instale un enclavamiento para inertizar o apagar automáticamente el proceso al producirse una pérdida de vacío.

2.3.4 Control de las fuentes de ignición

2.3.4.1 Si un proceso o sistema presenta una elevada frecuencia de explosiones de polvo, realice las acciones siguientes:

- a) Opere el equipo que genera las chispas o partículas calientes/incandescentes en una atmósfera inerte. O BIEN:
- b) Instale un sistema de detección de chispas combinado con un sistema de extinción de chispas o una compuerta de escape de alta velocidad.
- c) Ubique el sistema de extinción de chispas o la compuerta de escape de alta velocidad aguas arriba del primer equipo que presente riesgo de explosión.
- d) Al activar el sistema de detección de chispas, apague cualquier equipo colector de polvo que esté conectado.

La instalación del sistema de detección de chispas conforme a las indicaciones anteriores no evita la necesidad de implementar elementos de mitigación de riesgos de explosión (3.1.18).

2.3.4.1.1 Se considera que los siguientes equipos presentan una alta frecuencia de explosiones de polvo:

- a) Industria maderera: secadores rotativos, secadores instantáneos, equipos de lijado, equipos de fresado de aglomerado (consulte la ficha técnica 7-10, *Wood Processing and Woodworking Facilities*, para obtener información sobre requisitos adicionales de protección contra incendios y explosiones relacionados con este sector).

b) Cualquier equipo de fresado mecánico con equipos conectados aguas abajo de este, por ejemplo, un ciclón (excepción: a los efectos de esta recomendación, los pulverizadores de carbón y los equipos de molienda de productos alimenticios humanos no se consideran equipos con una alta frecuencia de explosiones).

c) Procesos que producen de forma rutinaria chispas o partículas incandescentes (por ejemplo, debido a la molienda o fricción) que puedan entrar en un sistema colector de polvo.

d) Cualquier proceso o sistema que haya sufrido dos o más explosiones en un periodo de 10 años.

2.3.4.2 Para minimizar la ignición de la nube de polvo debido a la acumulación y descarga de electricidad estática, lleve a cabo las siguientes medidas:

a) Aplique todas las recomendaciones pertinentes de la ficha técnica 5-8, *Static Electricity*, para minimizar la probabilidad de ignición.

b) Si es posible, utilice para el transporte del polvo combustible tuberías y conductos metálicos, correctamente puestos a tierra y conectados equipotencialmente.

c) Si se utilizan tuberías o conductos de plástico para el transporte de material, la puesta a tierra y la conexión equipotencial no serán eficaces debido a las propiedades aislantes del plástico. Sin embargo, si estos sistemas tienen componentes conductores o metálicos, por ejemplo, tuberías de plástico o mangueras conectadas a tuberías metálicas, estos componentes conductores sí que deberán estar debidamente puestos a tierra y conectados equipotencialmente.

d) Si los materiales son fácilmente inflamables (energía mínima de ignición inferior a 10 mJ), considere las siguientes opciones para reducir la posibilidad de ignición estática:

1. Utilice cualquier equipo que presente un riesgo de explosión en un entorno inerte (consulte 2.3.2.4) (3.1.19).

2. La presión de servicio debe ser inferior a 0,1 bar abs. (1,5 psia).

3. Elimine la mezcla inflamable operando al 50 % de la concentración mínima explosiva (CME).

4. Reduzca la generación o acumulación de cargas aplicando cambios en el proceso, como una reducción del flujo de material transferido.

5. Instale eliminadores de electricidad estática o neutralizadores. Asegúrese de que están firmemente instalados y correctamente unidos y puestos a tierra, y de que no tienen acumulaciones de partículas extrañas.

6. Pida a alguien con experiencia especializada que evalúe la situación y desarrolle un plan de acción adecuado.

2.3.4.3 Instale separadores magnéticos aguas arriba de todos los equipos de reducción de tamaño, como trituradores, pulverizadores, molinos de martillo u otros equipos que impliquen un impacto mecánico con el material de proceso (3.1.20).

2.3.4.3.1 Los separadores que no sean magnéticos (por ejemplo, separadores de aire, rejillas, mallas gruesas) se pueden utilizar en caso de que pudieran entrar objetos de metal no ferroso o de otro tipo (por ejemplo, rocas) en el flujo de producto y provocar riesgos de ignición.

2.3.4.4 Los ventiladores y sopladores del flujo de aire-polvo fugitivo pueden convertirse en una fuente de ignición. Instale estos dispositivos como se recomienda a continuación:

2.3.4.4.1 En los sistemas de presión negativa, instale el ventilador en el lado de descarga (es decir, en el lado limpio) del colector de polvo.

2.3.4.4.2 En los sistemas de presión positiva, instale el soplador aguas arriba del punto de inyección de polvo.

2.3.4.4.3 Si, por motivos de diseño, el ventilador debe estar situado en el flujo de aire sucio y la concentración del flujo de aire-polvo es superior al 25 % de la CME:

a) Instale ventiladores y sopladores de tipo A o B o con un diseño resistente a las chispas conforme a la norma AMCA 99-0401-86 sobre clasificaciones de construcciones resistentes a las chispas (*Classifications for Spark Resistant Construction*).

b) Los ventiladores y sopladores ordinarios se pueden utilizar en un flujo de aire-polvo de concentración ilimitada si se ha demostrado mediante las pruebas pertinentes que el polvo es difícilmente inflamable.

2.3.4.4.4 Los ventiladores y sopladores ordinarios se pueden utilizar en un flujo de aire-polvo de concentración ilimitada si se ha demostrado mediante las pruebas pertinentes que el polvo es difícilmente inflamable.

2.3.4.4.5 Los sistemas que manipulan polvo de madera pueden utilizar ventiladores corrientes instalados aguas arriba de colectores de polvo con filtros de mangas siempre que se haya instalado un colector ciclónico (colector de polvo primario) aguas arriba del ventilador.

2.3.4.4.6 Se pueden utilizar ventiladores y sopladores ordinarios si se instala una compuerta de escape de alta velocidad o un sistema de extinción de chispas homologado por FM entre el ventilador y cualquier equipo importante o valioso existente aguas abajo.

2.3.4.5 Evite que materiales susceptibles al calentamiento espontáneo se conviertan en la fuente de ignición de una explosión mediante las siguientes medidas:

- a) Evite acumulaciones en los conductos manteniendo una velocidad de transporte suficiente.
- b) Evite acumulaciones en el equipo llevando a cabo tareas de limpieza con frecuencia.
- c) No permita que la humedad entre en contacto con estos materiales. No obstante, se pueden utilizar rociadores automáticos o sistemas de extinción de chispas en los conductos si es necesario.
- d) Limpie diariamente los colectores que manipulen residuos susceptibles al calentamiento espontáneo, o según sea necesario, para evitar el calentamiento y acumulaciones peligrosas.

2.3.4.6 Evite el uso de accionamientos mecánicos que funcionen a una potencia o velocidad angular elevadas, ya que pueden provocar la ignición del polvo como consecuencia del calor generado por la fricción o las chispas.

2.3.4.6.1 Utilice las siguientes directrices para determinar las posibilidades de que se produzcan condiciones peligrosas en función de la velocidad tangencial (v) del componente giratorio:

- a) Si $v < 1$ m/s (3,3 ft/s): no hay riesgo de ignición.
- b) Si $1 < v < 10$ m/s ($3,3 < v < 33$ ft/s): evalúe cada caso por separado teniendo en cuenta las características específicas del producto y el material, como la EMI y el tamaño de las partículas (en ambos casos, cuanto menor sea el valor más susceptible es de provocar riesgos de ignición).
- c) Si $v > 10$ m/s (33 ft/s): siempre existe la posibilidad de ignición.
Nota: Para convertir la velocidad angular (rev/min) en velocidad tangencial, utilice
 $v = \text{rev/min} \times 2 \pi r \times 1/60$, donde
 v = longitud (mismas unidades que r) por segundo
 r = longitud de la pieza giratoria, desde el centro del eje hasta la punta exterior

2.3.4.6.2 Si se utiliza un equipo de baja velocidad y alta potencia, normalmente en operaciones de amolado o tornillos sin fin y mezcladores, deben tenerse en cuenta las posibilidades de que se produzca un calentamiento incontrolado como consecuencia de un tiempo de permanencia excesivo, acumulaciones en cojinetes, objetos extraños, etc. y proteger el equipo de dicho calentamiento mediante el uso de pasadores de seguridad, dispositivos de detección y alarma de sobrecarga, un mantenimiento y limpieza adecuados, y mallas y separadores.

2.4 Colectores de polvo y ciclones

Además de los requisitos mencionados anteriormente y en la ficha técnica 7-73, *Dust Collectors*, a continuación se indican algunos requisitos específicos para colectores de polvo y ciclones.

2.4.1 Construcción y ubicación

2.4.1.1 Para nuevas instalaciones, utilice sistemas colectores de polvo independientes para cada zona de proceso para minimizar la posibilidad de que se produzca una explosión de polvo que afecte a múltiples operaciones. Por ejemplo, si existe una zona para serrado de madera sin transformar y otra para lijado de madera acabada, cada una de ellas con distintas sierras y estaciones de lijado, el uso de dos colectores de polvo independientes podría reducir el tiempo de inactividad de un solo suceso. Esto resulta más fiable que utilizar dispositivos de aislamiento de explosiones a través de un sistema de colectores.

2.4.2 Protección (3.1.21)

2.4.2.1 Al determinar la superficie de venteo de explosión para un colector de polvo con filtros (por ejemplo, bolsas de tela, hojas de papel de filtro o cartuchos), se deben incluir los lados de aire limpio y aire sucio para calcular el volumen del colector.

2.4.2.2 Para los colectores de polvo con filtros, instale los venteos de explosión completamente en el lado sucio del volumen del colector.

2.4.2.2.1 Si es necesario instalar algún panel de venteo en el lado limpio, utilice la siguiente ecuación para calcular la superficie mínima de la superficie de venteo de explosión total que debe situarse en el lado sucio:

$$A_{v,sucio,min} \geq (V_{sucio}/V_{total})^{2/3} \times A_{v,total}$$

donde:

$A_{v,total}$ es la superficie de venteo total necesaria.

$A_{v,sucio,min}$ es la superficie mínima de venteo de explosión que debe situarse en el lado sucio del colector de polvo.

V_{sucio} es el volumen del lado sucio del colector de polvo.

V_{total} es el volumen total del colector de polvo.

2.4.2.3 Se puede considerar que los ciclones de polvo ofrecen una protección contra explosiones adecuada sin necesidad de venteos de explosión adicionales siempre que cumplan TODOS los criterios siguientes:

- a) El polvo que se esté procesando debe tener un valor de K_{st} no superior a 80 bar.m/s.
- b) El escape debe dirigirse directamente a la atmósfera a través de una salida de gas situada en la parte superior del ciclón.
- c) El diámetro de la salida de gas debe ser de al menos el 45 % del diámetro del propio ciclón.
- d) La salida libre de gases no debe estar obstruida por ninguna malla.

1. La instalación de una cubierta para la lluvia sobre la abertura de la salida de gas no incumplirá este criterio siempre que la distancia entre esta y la salida de gas no sea inferior a la mitad del diámetro de la salida de gas (3.1.22).

2.4.2.3.1 Calcule el tamaño de los venteos de explosión para todas las demás situaciones (valor de K_{st} superior, salida de gas de menor tamaño, salidas de gas con un conducto acoplado cuya relación L/D sea superior a 1, un conducto con un codo, etc.) mediante el software DustCalc de FM Global.

2.4.3 Control de las fuentes de ignición

2.4.3.1 No es necesario que los colectores con filtros de mangas tengan un material conductor especial para disipar cargas eléctricas estáticas.

- a) Si el colector utiliza estos filtros de mangas conductoras especiales, inicie un programa de inspección y mantenimiento para asegurarse de que las correas utilizadas para conectar a tierra los filtros de mangas están debidamente fijadas a la estructura del colector de polvo en todo momento.
- b) Independientemente del tipo de filtro de mangas utilizado, habilite una puesta a tierra segura para las cestas de los filtros de mangas (soportes de cables metálicos) (3.1.23).

2.4.4 Colectores de polvo sin cerramiento (3.1.24)

Los colectores de polvo sin cerramiento suelen estar ubicados en la misma sala que el equipo correspondiente.

2.4.4.1 Se pueden utilizar colectores de polvo sin cerramiento si cumplen todos los criterios siguientes:

- a) No se utilizan con equipos que produzcan chispas, partículas calientes o incandescentes, como trituradores de metal, operaciones de lijado, pulido abrasivo o procesos de trabajo en caliente.
- b) No se utilizan para polvo metálico.
- c) La sala en la que se utilicen está equipada con rociadores automáticos diseñados para proteger la actividad predominante.
- d) Cada sistema colector tiene una capacidad máxima de manipulación de aire de 140 m³/min (5.000 ft³/min).
- e) El sistema colector se utiliza de manera discontinua u ocasionalmente y no se utiliza en procesos de producción continuos o frecuentes.
- f) El soporte del filtro no se agita ni se presiona con impulsos de manera que desprenda polvo durante el funcionamiento.
- g) La energía mínima de ignición (EMI) de los materiales recogidos es superior a 500 mJ.
- h) El polvo recogido se elimina diariamente o con una frecuencia suficiente para limitar la cantidad de polvo recogido a menos de 9 kg (20 lb).
- i) El polvo fugitivo está debidamente controlado y su acumulación no supera los 2 mm (1/16 in) y no se extiende más allá de 3 m (10 ft) del sistema.
- j) Si existen varios sistemas colectores en la misma sala, estos están separados entre sí al menos 6 m (20 ft).
- k) Los sistemas colectores están separados del almacenamiento combustible o de cualquier otro tipo al menos 6 m (20 ft).
- l) El medio filtrante no se encuentra a menos de 11 m (35 ft) de ninguna llama expuesta o superficie caliente capaz de inflamar una nube de polvo del material que contenga.

- m) Los ventiladores o sopladores ubicados en el flujo de aire sucio se instalan según la sección 2.3.4.4.
- n) Los equipos eléctricos ordinarios no se encuentran a menos de 3 m (10 ft) del sistema colector.
- o) El motor del ventilador o del soplador, que no se encuentre en el flujo de aire sucio, es adecuado para ubicaciones de clase II, división 2 o de clase III (zona 22), según corresponda.

2.5 Conductos de conexión (3.1.25)

Los conductos que conectan piezas de un proceso o sistema colector pueden convertirse en la ruta por la que se propague una explosión inicial y pueden contener suficiente polvo como para propagar una explosión propia. Esta sección no se aplica a los conductos de aire limpio situados aguas abajo de los separadores de aire y materiales ni a la transferencia neumática de materiales de proceso con una concentración superior a la CME (transferencia de fase densa).

2.5.1 Actividad

2.5.1.1 Controle la concentración de polvo en un sistema colector de polvo fugitivo para evitar que se desarrolle una atmósfera inflamable y continua en el conducto mediante los siguientes métodos:

- a) Si la tasa de generación de polvo es variable, mantenga el polvo por debajo de una concentración media del 25 % de la concentración mínima explosiva (CME). La tasa máxima de emisión de polvo por encima del 100 % de la CME debe limitarse a tan solo unos segundos en todo momento.
- b) Si la tasa de generación de polvo es estable sin picos significativos, mantenga la concentración de polvo en ≤ 90 % de la CME.

2.5.1.2 Si la concentración en un conducto supera con regularidad la CME, proporcione protección para el riesgo adicional de explosión en el interior del conducto (2.5.2.3).

2.5.1.3 En conductos que transporten polvo combustible, mantenga una velocidad del aire superior a la velocidad de sedimentación del material transportado.

Nota: La velocidad para polvo industrial típico (por ejemplo, serrín) puede ser de 1.070 a 1.220 m/min (3.500 a 4.000 ft/min). Si se desconoce la velocidad de sedimentación de un material, consulte la ficha técnica 7-78, *Industrial Exhaust Systems*, para obtener recomendaciones generales sobre la velocidad de transporte.

2.5.2 Protección

2.5.2.1 En los conductos que contengan polvo combustible en concentraciones que siempre sean inferiores a la CME y que transporten polvo a velocidades a las que sea poco probable que se asiente el polvo, instale dispositivos de aislamiento de explosiones:

- a) en las conexiones a equipos importantes; y
- b) en conductos que se dirijan a edificios que contengan equipos costosos o donde tengan lugar procesos importantes que pudieran resultar dañados o que puedan contener polvo fugitivo.

Si no dispone del valor de CME, se puede utilizar una estimación de 30 g/m³ (0,03 oz/ft³).

2.5.2.2 Disponga los conductos que contengan polvo combustible en concentraciones que superen siempre o con frecuencia la CME, o que transporten polvo a velocidades a las que sea poco probable que se asiente el polvo, como se indica a continuación:

- a) Dirija los conductos hacia el exterior.
- b) Instale un dispositivo de aislamiento de explosiones en cada punto de conexión entre el conducto y un equipo.
- c) Proteja el conducto de una eventual explosión que pueda propagarse en la mezcla explosiva de una de las siguientes maneras:
 1. Instale venteos para el conducto de acuerdo con la sección 2.5.2.3.
 2. Diseñe el conducto para que falle a presiones tan bajas como sea factible, pero nunca a más de 0,3 bar man. (4,4 psig).

2.5.2.2.1 Si el conducto que contiene polvo por encima de la CME o que lo transporta a una velocidad inferior a la velocidad de sedimentación del polvo debe colocarse en interiores, tome las siguientes precauciones:

- a) Instale un dispositivo de aislamiento de explosiones en cada punto de conexión entre el conducto y un equipo.
- b) Diseñe el conducto para que sea capaz de contener la explosión (resistente a los golpes de presión).
O bien:

- c) Instale los venteos necesarios para el conducto de acuerdo con la sección 2.5.2.3, pero dirija los paneles hacia el exterior.

2.5.2.3 Instale venteos de explosión a lo largo de la longitud de un conducto conforme a lo siguiente:

- a) Calcule la distancia máxima entre los venteos de explosión (L_{max}) de la siguiente manera:

$$L_{max} = 7,5 D^{1/3}, \text{ D y L en metros, O BIEN}$$

$$L_{max} = 16,5 D^{1/3}, \text{ D y L en pies.}$$

Para los conductos no circulares, calcule el diámetro efectivo para la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4A_d}{\pi}}$$

donde: A_d = sección transversal del conducto (m^2 o ft^2)

- b) La superficie de venteo de cada ubicación debe ocupar una superficie equivalente, como mínimo, a la de la sección transversal del conducto.
- c) Instale un panel de venteo de tamaño completo a una distancia no superior a 2 veces el diámetro desde el punto de conexión del conducto hasta un equipo.
- d) Ajuste los valores de presión de alivio de venteo de explosión (P_{stat}) más bajos posibles, con un valor máximo de 0,1 bar man. (1,5 psig).
- e) Instale un venteo de explosión en todos los codos y bridas de extremo (consulte la figura 10).
- f) Si se encuentra en el interior, dirija los productos de explosión hacia el exterior a través de un conducto corto (L/D inferior o igual a 1).

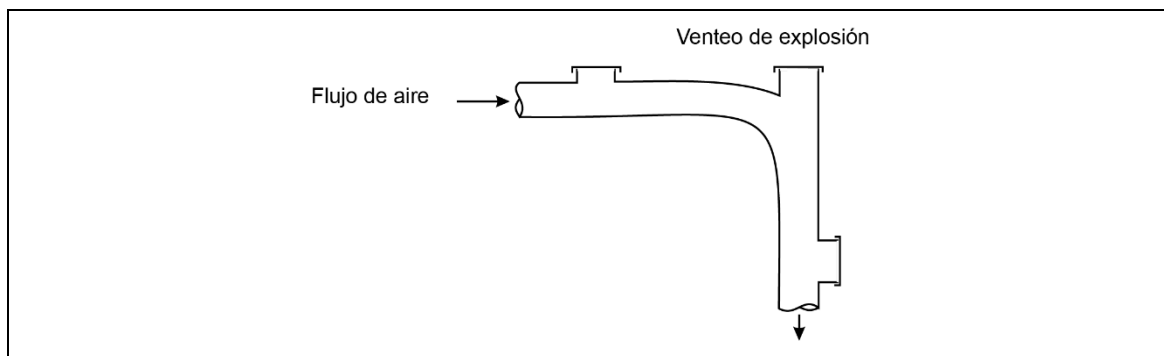


Figura 9. Ejemplo de venteo de explosión en el codo de un conducto

2.6 Silos (3.1.26)

2.6.1 Protección

2.6.1.1 Si un silo de almacenamiento de polvo tiene un colector de polvo (otro que no sea una simple manga de aireación) en el venteo, instale un sistema de protección contra explosiones de la siguiente manera:

- a) Trate la combinación de colector/silo como una sola unidad si se da alguna de las siguientes condiciones:
1. El conducto que conecte el silo con el colector de polvo tiene una relación L/D inferior a 2.
 2. La sección transversal del conducto de conexión es al menos tan grande como la superficie de venteo de explosión necesaria para proteger solamente el volumen del colector de polvo.
- b) Instale venteo de explosión para la combinación de silo/colector en función del volumen total de las dos unidades.
- c) Si es posible, instale parte del venteo de explosión en el colector de polvo, sin superar la sección transversal del conducto de conexión, aunque todo el venteo de explosión puede estar en el silo.

2.6.1.2 Si la combinación de colector de polvo/silo no cumple los criterios de una sola unidad:

- a) Instale venteo de explosión para cada componente en función del volumen de cada uno.
- b) Instale venteo de explosión para el conducto de conexión de acuerdo con la sección 2.5.2.3.

2.6.1.3 Asegúrese de que la superficie de venteo de explosión proporcionada para un silo no supera su sección transversal (A_{x-sect}). Un panel de venteo que supere este valor no contribuirá a reducir la presión de explosión.

2.6.1.3.1 Si los cálculos demuestran que la superficie de venteo de explosión necesaria es superior a la sección transversal, utilice un sistema de supresión de explosiones o refuerce el silo para que pueda soportar el valor de P_{red} correspondiente a $A_v = A_{x-sect}$.

2.6.2 Equipos y procesos

2.6.2.1 No utilice cañones de aire para romper material apelmazado en silos donde se manipulen materiales combustibles en los que haya partículas de tamaño inferior a aproximadamente 500 micras.

2.7 Elevadores de cangilones (3.1.27)

2.7.1 Construcción y ubicación

2.7.1.1 Los elevadores de cangilones cerrados que manipulan polvo combustible suponen un riesgo de explosión y deben instalarse de acuerdo con una de las siguientes condiciones:

- a) Ubique los elevadores de cangilones en el exterior.
- b) Ubique los elevadores de cangilones interiores junto a una pared exterior para que el venteo de explosión pueda dirigirse hacia el exterior a través de conductos cortos.
- c) Instale el elevador de cangilones interior con sistemas de supresión o venteo de explosión mediante apagallamas homologados por FM.

2.7.1.2 Si se añaden revestimientos al interior de un elevador de cangilones para solucionar problemas puntuales de erosión, utilice materiales no combustibles.

2.7.2 Protección

2.7.2.1 Para elevadores de cangilones cerrados que manipulen polvo cuyo valor de K_{st} sea inferior a 200, instale venteos de explosión teniendo en cuenta lo siguiente:

- A. Instale los venteos de explosión a lo largo de la altura del elevador de cangilones respetando la separación entre ejes especificada en la tabla 2, en función del tipo de elevador y de los valores de K_{st} y P_{red} del cerramiento.
- B. Dirija el venteo de explosión de los elevadores interiores hacia el exterior por conductos rectos cortos (menos de 1 m [3 ft]) o instale venteos sin llama homologados por FM.
- C. Se pueden instalar venteos de explosión en los laterales o en la parte frontal de la carcasa.
- D. Instale un venteo de explosión en la sección del cabezal (parte superior) equivalente a la sección transversal de la pata de la carcasa.
- E. Instale el primer venteo de la carcasa lo más cerca posible del pie (parte inferior) del elevador de cangilones, pero sin superar la separación especificada en la tabla 2.
- F. Ajuste el tamaño del venteo de explosión de tal manera que sea equivalente a la sección transversal del cerramiento de la pata del elevador. La superficie de venteo se puede lograr instalando venteos del 50 % de la superficie prevista en lados opuestos del cerramiento.
- G. En diseños de carcasa doble, instale venteo de explosión en la parte de subida y de bajada.
- H. Ajuste la presión de alivio del venteo de explosión (P_{stat}) a 0,1 bar man. (1,5 psig) o menos y utilice venteos de material ligero.

Tabla 2. Venteo de explosión para elevadores de cangilones

Tipo de elevador de cangilones	K_{st} (bar.m/s)	Separación, m (ft)		
		$P_{red} \leq 0,2$ bar	$0,2 < P_{red} \leq 0,5$ bar	$< 0,5 P_{red} \leq 1,0$ bar
Carcasa doble	< 100	6 (20)	No es necesario	No es necesario
	100-150	3 (10)	10 (33)	19 (62)
	151-175	N/P	4 (13)	8 (26)
	176-200	N/P	3 (10)	4 (13)
Carcasa simple	< 100	N/P	No es necesario	No es necesario
	100-150	N/P	7 (23)	14 (46)
	151-175	N/P	4 (13)	5 (16)
	176-200	N/P	3 (10)	4 (13)

Nota: N/P = No permitida

A menos que se trate de un diseño especial, suponga que $P_{red} = 0,2$ bar.

2.7.2.2 Si el cabezal o el pie del elevador se introducen en equipos o zonas que presenten riesgo de explosión, habilite un sistema de bloqueo de explosiones mediante dispositivos de supresión de explosiones u otro tipo de barrera física, como una esclusa de aire giratoria entre el cabezal o el pie y zonas o equipos adyacentes.

2.7.2.3 Proteja los elevadores de cangilones mediante rociadores automáticos de la siguiente manera:

- En la parte superior del eje del elevador de cangilones vertical donde el cerramiento no es combustible. Si el cerramiento está fabricado con materiales combustibles, instale protección adicional con rociadores automáticos a lo largo del eje (es decir, trátelo como si fuera un eje vertical con laterales combustibles) con una separación de 3 a 3,7 m (10 a 12 ft) entre ellos.
- El diseño del rociador automático debe proporcionar un caudal mínimo de 95 L/min (25 gpm) desde el rociador más desfavorable hidráulicamente.
- Si los rociadores se encuentran en zonas susceptibles a las heladas, asegúrese de que la instalación es adecuada para las temperaturas previstas.

2.7.3 Control de las fuentes de ignición

2.7.3.1 Para evitar que se produzcan explosiones en el elevador de cangilones:

- Instale elevadores accionados por correa con un dispositivo mecánico o electromecánico para interrumpir la alimentación del motor de accionamiento y hacer sonar una alarma si la correa se ralentiza más del 20 %.
- No coloque ni exponga los cojinetes en el interior de la carcasa del elevador.
- Instale enclavamientos de alineación de la correa para que el elevador se detenga si la correa no está alineada correctamente.

2.7.3.2 Utilice las siguientes medidas preventivas cuando sea posible:

- Utilice cojinetes antifricción en todas las patas del elevador.
- Mantenga todos los cojinetes según las recomendaciones del fabricante y libres de polvo, productos y lubricación excesivos.
- Limite el uso de revestimientos combustibles (por ejemplo, plástico, caucho o madera) a puntos de impacto, superficies de desgaste y tolvas conectadas.
- Instale correas de transmisión (por ejemplo, correas trapezoidales, correas de distribución y correas planas) que sean conductoras de electricidad a 1 MΩ o menos, además de ser resistentes al fuego y al aceite.
- Diseñe el tren de transmisión con un factor de servicio de 1,5 para detener la transmisión sin que patine.
- Instale correas en las patas del elevador con una resistividad superficial inferior a 100 MΩ por cuadrado, y resistentes al fuego y al aceite (no se necesita resistencia al aceite en los molinos de harina).
- En situaciones en que las patas del elevador se encuentren dentro de un edificio y la velocidad de la correa supere los 2,6 m/s (500 ft/min), deberá instalarse un sistema de control de la temperatura de los cojinetes o de detección de vibraciones.

2.8 Secadores por atomización

2.8.1 Protección

2.8.1.1 Los secadores por atomización suelen funcionar con la mayor parte del secador a una concentración inferior a la CME. Instale protección contra explosiones de acuerdo con lo siguiente:

- a) Obtenga cálculos exactos para confirmar que la concentración media de polvo dentro de la parte con forma cilíndrica está por debajo de la CME del material que se esté manipulando. Sobre esta base, solo la sección cónica de la parte inferior del secador y cualquier equipo situado aguas abajo (por ejemplo, ciclones o colectores tipo bolsa) tendrán una mezcla explosiva.
- b) Donde exista una nube combustible solo en una fracción del volumen total del recipiente, utilice el software DustCalc de FM Global para determinar la superficie de venteo de explosión necesaria.
- c) Distribuya uniformemente los venteos de explosión por toda la superficie del secador, aunque se recomienda usar venteos únicamente cerca de la sección cónica.

2.8.1.2 Para obtener información sobre la protección contra incendios, consulte la sección sobre secadores por atomización que manipulan polvo de la ficha técnica 6-9, *Industrial Ovens and Dryers*.

2.9 Manipulación de grano crudo a granel

2.9.1 Equipos y procesos

2.9.1.1 La manipulación de grano crudo a granel supone un riesgo de explosión de polvo que se puede controlar o eliminar si se lleva a cabo lo siguiente:

- a) Utilice un método de supresión de polvo mediante aceite (u otro líquido) nebulizado para reducir el riesgo de explosión de polvo en salas o edificios y equipos utilizados para manipular grano crudo a granel.
 1. El riesgo de explosión puede considerarse eliminado en salas si el aceite nebulizado logra reducir las emisiones de polvo fugitivo a un nivel lo suficientemente bajo como para que los procedimientos ordinarios de orden y limpieza puedan mantener las acumulaciones por debajo de los niveles de riesgo (consulte la sección 2.2.4.2 para determinar en qué casos se encuentran las acumulaciones de polvo en niveles peligrosos).
 2. El riesgo de explosión puede considerarse eliminado en equipos si el aceite nebulizado logra evitar que el polvo se disperse por el aire en el interior del equipo. Verifique esto observando el equipo mientras está en funcionamiento (es decir, abriendo los puertos de acceso o inspección). La eliminación total del polvo en suspensión en el interior del equipo de proceso solo se puede realizar aplicando abundante nebulización a todo el material que se esté manipulando.
- b) Aplique el aceite u otro agente supresor líquido al grano en un punto del proceso en el que se produzcan turbulencias considerables (por ejemplo, en una boquilla de descarga) para garantizar que el agente supresor se mezcla completamente con el grano.
 1. No aplique el agente supresor en elevadores de cangilones, ya que esto podría provocar que patinasen las correas de caucho y un eventual calentamiento por fricción.
- c) Desarrolle un programa de mantenimiento e inspección para garantizar que el sistema de rociado del agente supresor de polvo funciona correctamente siempre que se manipule el grano.
- d) Si el sistema de nebulización de agente supresor es el único medio existente de protección contra explosiones, instale un enclavamiento que detenga la manipulación de grano en caso de que dicho sistema de supresión no funcione correctamente,

2.10 Fabricación aditiva (impresión 3D) (3.1.29)

En la mayoría de los procesos de fabricación aditiva se utiliza polvo muy fino de materiales como el metal, el plástico, la cerámica o el vidrio. El polvo fino se puede dispersar fácilmente en el aire y el polvo metálico combustible puede tener una energía de ignición baja. El equipo suele ser costoso y requiere suministros especiales, por lo que puede estar ubicado en zonas, salas o edificios específicos. A continuación, se proporciona una serie de directrices para los procesos de fabricación aditiva en los que se utiliza polvo combustible.

2.10.1 Aplique medidas de seguridad básicas para la manipulación y el almacenamiento de polvo combustible.

2.10.1.1 En particular, se deben poner a tierra y conectar equipotencialmente todos los equipos que procesen polvo combustible fino, ya que podría ser especialmente susceptible a la ignición por electricidad estática.

2.10.2 Ubique el equipo de fabricación aditiva en zonas separadas de otros sectores de fabricación o almacenamiento por un espacio libre o paredes, o en un edificio distinto.

2.10.3 Almacene, manipule y transporte polvo en recipientes conductores cerrados.

2.10.4 Si se almacena o manipula polvo con un EMI inferior a 10 mJ en recipientes no conductores, utilice recipientes que disipen la electricidad estática. Los materiales que se consideran disipadores de electricidad estática tienen una resistencia superficial de entre 10^5 y $10^9 \Omega/\text{cuadrado}$ (NFPA 77).

2.10.5 Cuando se manipule o transfiera polvo, controle la liberación accidental de polvo, la formación de nubes en suspensión y mantenga un alto nivel de orden y limpieza.

2.10.6 En los casos en que se utilicen sistemas de tuberías para transferir polvo, controle la acumulación de electricidad estática mediante puesta a tierra y conexión equipotencial con una resistencia máxima de 1 M Ω .

2.10.7 Si se utiliza un equipo de fabricación aditiva en una atmósfera inerte, realice lo siguiente:

- A. Utilice el equipo a una concentración inferior a la CLO del polvo medido con el gas que se esté utilizando.
 - 1. Si la CLO es superior o igual al 5 %, mantenga un margen de seguridad de al menos el 2 % por volumen por debajo de la CLO.
 - 2. Si la CLO es inferior al 5 %, utilice el equipo a no más del 60 % de la CLO.
- B. Controle la concentración de gas inerte u oxígeno.
- C. Instale un enclavamiento con el sistema para evitar que este se ponga en marcha si el nivel de inertización no es aceptable.
- D. Detenga el sistema si se superan los niveles seguros de gas inerte u oxígeno.

2.10.8 Procese el producto terminado (recolección) de forma que se minimice o controle la liberación de polvo arrastrado de la siguiente manera:

- A. Asegúrese de que los operadores están correctamente puestos a tierra antes de abrir el cerramiento de impresión.
- B. Limpie el exceso de polvo del producto en un cerramiento o campana debidamente ventilados con un sistema colector de polvo diseñado adecuadamente.

2.10.9 Asegúrese de que las aspiradoras portátiles utilizadas para limpiar el exceso de polvo están clasificadas para su uso en una zona de clase II, división 2 o zona 22, y de que los componentes ubicados dentro de los cerramientos que contienen el polvo combustible recogido están clasificados como equipos de clase II, división 1 o zona 20.

2.10.9.1 Utilice aspiradoras portátiles certificadas por una agencia independiente de confianza.

2.10.10 Para zonas de fabricación y almacenamiento de construcción combustible o donde se realicen actividades con materiales combustibles, instale un sistema de rociadores automáticos diseñado para actividades de trabajo con metales de categoría HC2.

2.10.11 En las zonas en las que se manipule o almacene polvo metálico combustible, instale extintores portátiles de clase D y proporcione al personal formación sobre cómo usarlos correctamente.

2.11 Riesgos de incendio en polvo

Además del riesgo de explosión tratado en este documento, el polvo combustible puede suponer un riesgo de incendio que debe controlarse. Las siguientes fichas técnicas cubren la protección y prevención de incendios en polvo en diversos equipos o procesos:

- a) Dentro de secadores por atomización: ficha técnica 6-9, *Industrial Ovens and Dryers*
- b) Instalaciones relacionadas con el sector de la madera y su transformación: ficha técnica 7-10, *Wood Processing and Woodworking Facilities*
- c) Colectores de polvo: ficha técnica 7-73, *Dust Collectors and Collection Systems*
- d) Instalaciones de manipulación de grano: ficha técnica 7-75, *Grain Storage and Milling*
- e) Conductos: ficha técnica 7-78, *Industrial Exhaust Systems*
- f) Almacenamiento de polvo de madera: ficha técnica 8-27, *Storage of Wood Chips*

3.0 FUNDAMENTO DE LAS RECOMENDACIONES

3.1 Comentarios y asistencia técnica

3.1.1 ¿Hay algún problema de orden y limpieza? (2.2.4.2)

La pauta fundamental consiste en que cualquier acumulación de polvo fuera del equipo puede causar una explosión secundaria y, por lo tanto, debe eliminarse junto con la fuente de liberación del polvo. Proporcione construcción con limitación de daños (CLD) para las zonas sujetas a liberaciones no controladas que no se puedan resolver.

Como regla general, una acumulación de polvo de 2 mm (1/16 in) ya es suficiente para que se requiera una limpieza (para este cálculo se supone una densidad aparente del polvo de madera aproximada de 580 kg/m³ [36 lb/ft³]). Este es el grosor aproximado de una moneda de 10 céntimos de euro.

Si se utiliza polvo de distinta densidad aparente, el grosor de la masa equivalente del polvo de madera de 2 mm (1/16 in) sería inversamente proporcional a su densidad aparente. Por ejemplo, para un polvo con una densidad aparente de aproximadamente 950 kg/m³ (60 lb/ft³), una capa de aproximadamente 1 mm (0,04 in) de grosor sería equivalente.

Grosor equivalente = 2 mm x (580 kg/m³/950 kg/m³) o 1 mm

Cualquier acumulación de polvo en una sala pequeña (19 m² [200 ft²]) supondría un grave riesgo de explosión secundaria. En una sala más grande, por ejemplo, de 1.860 m² (20.000 ft²), la acumulación de polvo en una zona de 19 m² (200 ft²) sería menos grave.

Por motivos prácticos, algunas acumulaciones de polvo en zonas pequeñas de grandes zonas sin CLD se pueden considerar aceptables siempre que se limpien con frecuencia y se apliquen las medidas necesarias para eliminar la fuente de polvo. Considere el 5 % de la zona con 2 mm (1/16 in) de polvo susceptible de dispersarse en el aire como límite de tolerancia. En cualquier edificio de construcción ordinaria, una acumulación de polvo cuya superficie sea superior a 93 m² (1.000 ft²) se considera inaceptable.

Cualquier tipo de polvo que se encuentre por encima del nivel del suelo en cerchas, vigas, partes superiores de equipos, etc., debe considerarse susceptible de dispersarse en suspensión. El polvo que se haya aglomerado por la acción del tiempo, el calor, la humedad, etc., no debe considerarse susceptible de quedar en suspensión, pero puede ser un indicio de un problema de orden y limpieza o una fuente de liberación no controlada. El polvo del suelo podría acabar en suspensión, pero es un riesgo menor que una acumulación significativa.

Preste especial atención al polvo adherido a las paredes, ya que se puede desprender fácilmente. Tenga en cuenta también otras proyecciones, como los accesorios de iluminación, ya que pueden tener superficies donde se acumule polvo.

La superficie disponible para depósitos de polvo en cerchas o vigas de acero puede estimarse en aproximadamente el 5 % de la superficie del suelo. Sin embargo, algunas vigas de acero pueden tener una superficie equivalente de hasta el 10 % de la superficie del suelo, por ejemplo cuando los tramos entre columnas tienen una longitud superior a la media para una zona geográfica determinada o cuando una diferencia notable de elevación del edificio hace que sea necesaria una estructura de cubierta más resistente debido a las cargas de nieve previstas.

A modo de referencia, a continuación, se proporcionan los datos de densidad aparente típicos.

Tabla 3. Densidad aparente típica del polvo

Materiales	kg/m ³	lb/ft ³
Carbón, bituminoso, inferior a 420 micras	800	50
Harina, trigo	560-640	35-40
Almidón	400-800	25-50
Azufre, en polvo	800-960	50-60
Harina de madera	260-580	16-36

Fuente: Anexo D, referencia 15

3.1.2 Reubicación de riesgos de explosión en exteriores (2.3.1.1)

Una objeción frecuente a la hora de ubicar los equipos de manipulación de polvo en el exterior es el hecho de que se forme condensación en las paredes internas del recipiente con bajas temperaturas y de que entre humedad en el flujo de polvo. La humedad puede ser un problema para el proceso si provoca aglomeración de partículas o se obtiene un producto no conforme con las especificaciones. Esto puede resultar peligroso con materiales susceptibles al calentamiento espontáneo. La humedad se puede eliminar mediante el aislamiento del equipo de manipulación de polvo. No obstante, los venteos de explosión deben implementarse correctamente sin que se vean afectados por la cubierta aislante. Hay disponibles venteos de explosión de ruptura prefabricados que tienen un núcleo con aislamiento de espuma para evitar

la condensación en el interior del panel de venteo. Estos venteos no requieren la aplicación de ningún aislamiento adicional, lo que garantiza que el aislamiento no suponga un problema para la implantación de los paneles.

3.1.3 Inertización (flegmatización) (2.3.2.3)

El polvo combustible y no combustible deben mezclarse perfectamente para crear un producto seguro y no explosivo. Por lo general, se requiere una cantidad de polvo inerte que oscile entre un 50 % y un 75 % del peso total.

En ocasiones, se utilizan carbonatos, fosfatos y sales para la inertización. En la industria minera del carbón, se utiliza polvo de roca porque lo hay en abundancia. Lamentablemente, no existe ninguna correlación matemática que permita predecir la concentración límite de polvo inerte necesaria. Todas las mezclas deben analizarse para determinar el grado de inercia de la mezcla.

3.1.4 Determinación de efectos de las explosiones de FM Global: DustCalc (2.3.3.1)

Existen diversas recomendaciones que sugieren el uso del software DustCalc de FM Global para realizar cualquier cálculo relacionado con la predicción de presiones de explosión a partir de las condiciones específicas de una situación determinada. Se trata de un sistema experto patentado desarrollado por FM Global que considera las variables enumeradas a continuación para calcular diversos efectos de las explosiones.

Los modelos matemáticos están basados en años de investigaciones sobre explosiones de polvo llevadas a cabo por FM Global y otros. Algunas de las relaciones se han compartido con la NFPA y se han adoptado en parte en la NFPA 68 a partir de la edición de 2002. Para aprovechar al máximo los métodos de FM Global, se debe utilizar el software DustCalc.

Las variables de los recipientes que influyen en los efectos de una explosión son las siguientes:

- volumen del recipiente (V)
- constante de explosividad del polvo (K_{st}) y presión máxima sin venteo (P_{max})
- superficie de venteo de explosión (A_v)
- presión de alivio de venteo de explosión (P_{stat})
- masa y orientación del panel de venteo de explosión
- longitud (L_d) y sección (A_d) del conducto de venteo de explosión, si lo hay
- fracción del volumen del recipiente que contiene una mezcla explosiva
- presión del equipo previa a la explosión (P_o)

Esta ficha técnica no incluye ninguna ecuación para determinar el tamaño de los venteos de explosión ni ofrece resultados de pruebas de polvo que permitan caracterizar materiales probados previamente. En primer lugar, las correlaciones matemáticas desarrolladas por FM Global para predecir el resultado de las explosiones son complejas y resultarían difíciles de aplicar utilizando únicamente una calculadora, dado que esto podría provocar fácilmente errores de cálculo. Los datos genéricos podrían resultar útiles para la evaluación preliminar de sistemas de venteo existentes, pero los datos del polvo específico que se esté procesando pueden ser diferentes y solo se deben utilizar datos de pruebas específicamente desarrolladas en el diseño.

El software DustCalc está disponible en todas las oficinas de FM Global del mundo, pero su uso está restringido al personal que haya recibido formación detallada sobre sus fundamentos y su uso. Esto permite garantizar que los resultados se desarrollan teniendo en cuenta todos los factores importantes del diseño.

Se ha publicado una descripción detallada del trabajo analítico y experimental que conduce a la metodología de FM Global en un artículo de una edición especial sobre la explosión de polvo del Journal of Loss Prevention in the Process Industries (primavera de 1996). Consulte el anexo C para obtener una referencia detallada de ese artículo.

FM Global no ha adoptado los métodos de cálculo de la Asociación de Ingenieros Alemanes (VDI, Verein Deutscher Ingenieure) (norma VDI 3673). Dado que gran parte de los datos utilizados para desarrollar las directrices de la VDI se usaron para desarrollar la guía de FM Global, es muy frecuente que las respuestas de DustCalc y VDI coincidan. Sin embargo, debido a las mejoras realizadas por FM Global en los métodos de la VDI, además de otras herramientas de cálculo desarrolladas o mejoradas por FM Global, el software DustCalc amplía las capacidades de la VDI.

Respecto a la versión de 2002 de la norma NFPA 68, FM Global remitió, y el comité de NFPA adoptó, gran parte (si bien no la totalidad) de las ecuaciones y métodos de FM Global. La implementación conlleva numerosas ecuaciones y nomogramas. La edición de 2007 conserva gran parte de los mismos métodos, pero con algunos ajustes adicionales.

La otra diferencia importante con respecto a la NFPA 68-2007 ha sido el cambio de «directriz» a «norma». Se trata actualmente de un texto que las autoridades jurisdiccionales locales pueden adoptar como legalmente vinculante. Antes, cuando era directriz, ninguna autoridad jurisdiccional podía implementar sus requisitos como vinculantes.

El programa de software DustCalc también puede proporcionar soluciones basadas en los métodos de la NFPA o la VDI, e indicará dónde (y, a menudo, por qué) existen diferencias con el método de FM Global.

3.1.5 Dispositivos de venteo sin llama (2.3.3.1.2)

Un dispositivo de venteo sin llama (tubo de extinción, apagallamas) (figura 10) es como un parallamas instalado en un dispositivo de venteo de explosión de disco de rotura. También se denomina «venteo de explosión sin llama» o «dispositivo de retención de partículas y parallamas» (NFPA). Debido al componente parallamas, la superficie de venteo efectiva es menor que en el caso de un venteo abierto.

Cuando se usan dispositivos de venteo sin llama, hay una serie de factores que se deben tener en cuenta: los valores K_{st} y P_{max} del polvo y la concentración de polvo (c_{st}), dónde se miden, el tipo de polvo, el factor de eficiencia (η_{total}) y el volumen de protección máxima (VPM).

Los factores K_{st} y P_{max} (ST-1, 2) son los únicos que se usan para determinar la superficie de venteo del recipiente protegido.

El tipo de polvo (no fundido, fundido o fibroso) afecta al factor de eficiencia del dispositivo de venteo sin llama. Actualmente, no existen dispositivos homologados por FM para su uso con polvo metálico.

El factor de eficiencia (η_{total}) es la fracción numérica (0,99 o menos) que representa el valor efectivo de la superficie de venteo después de tener en cuenta el impacto de los componentes parallamas del dispositivo. En las especificaciones de la *Guía de productos homologados por FM* se representa principalmente como «superficie de venteo efectiva». En las normas EN, se indica como «Eficiencia (Ef)». Su metodología para calcular la eficiencia es diferente a la utilizada en las pruebas de FM Approvals.

La superficie de venteo efectiva (SVE) es la superficie de venteo útil después de tener en cuenta el factor de eficiencia. La superficie de venteo efectiva solo se puede determinar mediante pruebas.

El volumen de protección máxima (VPM) está limitado por la carga de polvo en el dispositivo, $m_{st,max}$, la carga de polvo por superficie de venteo nominal (g/cm^2 o lb/in^2). Esta carga está directamente relacionada con la concentración de polvo nominal utilizada en las pruebas de FM Approvals (g/m^3 o lb/ft^3). Se trata simplemente de dos formas distintas de representar la cantidad de polvo que entra en el dispositivo de venteo sin llama.

La masa de polvo que se envía al dispositivo de venteo sin llama está relacionada con la concentración de polvo y el volumen del recipiente de ensayo (o protegido).

Si hay más polvo en el recipiente, se vería afectada la matriz de extinción y esto haría disminuir la eficacia. Si la carga es lo suficientemente alta, podría provocar el fallo del dispositivo de venteo sin llama. El VPM se basa en la carga de polvo empleada en la prueba de FM Approvals.

En la práctica, la carga de diseño se basa en el valor c_{st} del polvo utilizado en el diseño de dimensionamiento del venteo. El valor c_{st} es la concentración, determinada por la prueba, a la que K_{st} y P_{max} tienen lugar. En la práctica, puede que sea necesario ajustar el VPM si el valor c_{st} es diferente de la carga de polvo empleada en la prueba. El factor de ajuste es el siguiente:

$$V_{max2} = V_{max1} (c_{st1}/c_{st2}), \text{ donde:}$$

$$V_{max1} = \text{VPM indicado}$$

$$V_{max2} = \text{volumen corregido de } c_{st}$$

c_{st1} = concentración utilizada en las pruebas de FM Approvals

c_{st2} = concentración del polvo del diseño determinada por las pruebas

Para elegir un dispositivo de venteo sin llama adecuado, calcule la superficie de venteo necesaria en la aplicación y, a continuación, utilice la «superficie de venteo efectiva» indicada en las especificaciones de la *Guía de productos homologados por FM* para seleccionar el dispositivo que proporcionaría, como mínimo, la superficie de venteo necesaria. Para ello, pueden ser necesarios uno o más dispositivos.

Además, los dispositivos seleccionados no deben superar el VPM. Si se utilizan varios dispositivos para proporcionar el venteo necesario, se pueden sumar los VPM de cada dispositivo para determinar el VPM total. Por ejemplo, si se utilizan dos dispositivos, cada uno de ellos con un VPM de 3,1 m³ (110 ft³), el volumen del recipiente a proteger estará limitado a 6,2 m³ (220 ft³).

A medida que la explosión se ventea a través del dispositivo de venteo sin llama, cualquier polvo (quemado o no) se retiene, los gases de combustión se enfrían y ningún rastro de llama sale por el apagallamas. Además, los efectos (de la presión) de la explosión de campo fuera del venteo se reducen considerablemente. De este modo, el dispositivo de venteo sin llama puede ventear

una explosión en el interior con total seguridad, sin temor a prender combustibles cercanos o a causar una presión perjudicial en la sala. Sin embargo, los gases de salida sí están calientes, a una temperatura de alrededor de 100 °C (212 °F).

El efecto de la presión de los gases liberados se puede calcular de forma conservadora en función de una temperatura de salida de gas de aproximadamente 100 °C (212 °F) y de la siguiente ecuación:

$$\Delta p = 1.74 p_0 \frac{V_1}{V_0}$$

donde:

V_0 es el volumen del edificio (m³ o ft³)

V_1 es el volumen del equipo venteado (m³ o ft³)

p_0 es la presión ambiental absoluta (1,01 bar abs. o 14,7 psia)

Δp es el aumento de presión creado por los gases venteados (en bar o psi)

Por ejemplo, si el volumen del equipo es 1/100 del volumen del edificio, V_1/V_0 será 1/100 y el aumento de presión será de aproximadamente 18 mbar, 1,8 kPa (0,26 psi). Esto no causaría ningún daño significativo en el edificio.

En la lista de todos los dispositivos homologados por FM figura la eficiencia de venteo de cada uno, que es el factor que determina la reducción de la superficie de venteo efectiva del dispositivo. Esto es distinto del cálculo del efecto de la presión arriba indicado.

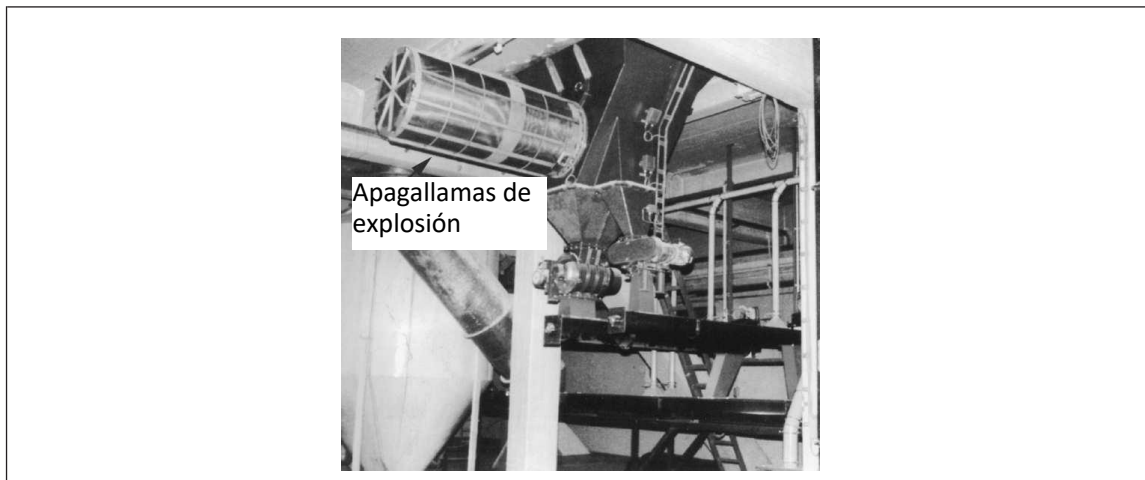


Figura 10. Dispositivo de venteo sin llama homologado por FM (fotografía cortesía de Rembe GmbH)

3.1.6 Resistencia de los recipientes (2.3.3.1.3)

Si el diseño del venteo de explosión se basa en valores de P_{red} que permiten la deformación de los recipientes, se evitará que se produzcan fallos catastróficos en los recipientes y permitir, asimismo, que las fuerzas y los productos de una explosión se desplacen de forma segura a través del venteo de explosión. Sin embargo, esto podría implicar que el recipiente no se pueda volver a utilizar.

Si no hay datos disponibles sobre la resistencia del recipiente y se usan los valores supuestos de 0,2 a 0,3 bar man. (3 a 4,4 psig) de P_{red} para el dimensionamiento del venteo de explosión, es probable que los recipientes no se deformen en caso de explosión (si presentan un diseño típico). Sin embargo, la posibilidad de deformación existe. Las innumerables variaciones en el diseño del equipo pueden hacer que un recipiente sea menos resistente que otros recipientes aparentemente similares. En la mayoría de los casos, los valores supuestos serán lo suficientemente conservadores como para evitar la rotura del recipiente. Las estimaciones de la presión que puede soportar un recipiente de tipo genérico plantean ciertas incertidumbres. Siempre es mejor intentar obtener información de diseño real sobre cualquier recipiente cuya protección se esté evaluando o planificando.

3.1.7 Efectos de la masa de venteo de explosión (inercia) (2.3.3.1.6)

Un panel de alivio de venteo de explosión pesado tarda más en apartarse que un panel ligero de tamaño similar y así poder provocar presiones más altas en el interior del cerramiento venteado. Dado que el retardo es una función continua del peso del panel, su efecto debe evaluarse siempre que la inercia de un panel sea superior a cero.

Las membranas de ruptura, que suelen ser láminas muy finas de metal o de plástico, son dispositivos con inercia cero. Sin embargo, el efecto de cualquier otro tipo de panel de venteo no se puede despreciar y debe calcularse.

Una extensa revisión de los datos experimentales generados por numerosas organizaciones de todo el mundo ha permitido a FM Global correlacionar los datos con un marco teórico para producir una herramienta predictiva eficaz.

3.1.7.1 Masa del panel de venteo típica (inercia)

Se muestran a continuación algunos ejemplos de materiales que se pueden utilizar como paneles de venteo o en la construcción de paredes, con su masa correspondiente:

- Paneles metálicos de una sola capa: 10 kg/m² (2 lb/ft²)
- Paneles sándwich metálicos con aislamiento: 15 a 20 kg/m² (3 a 4 lb/ft²)
- Panel Explovent homologado por FM: 12 kg/m² (2,5 lb/ft²)
- Panel Kalwall homologado por FM: 12 kg/m² (2,5 lb/ft²)

Nota: Los siguientes materiales tienen una dimensión extra de cm (pulgadas) de espesor.

- Panel de yeso: 8 kg/m²/cm (4 lb/ft²/in)
- Acero: 77 kg/m²/cm (40 lb/ft²/in)
- Aluminio: 27 kg/m²/cm (14 lb/ft²/in)
- Vidrio: 29 kg/m²/cm (15 lb/ft²/in)
- Hormigón: 23 kg/m²/cm (12 lb/ft²/in)

3.1.8 Efecto de los conductos de venteo de explosión (2.3.3.1.7)

El efecto del conducto de venteo se debe predecir al dimensionar los venteos de explosión. La colocación de un conducto en la descarga de un venteo de explosión puede afectar significativamente a la presión dentro del cerramiento. En función de la longitud y el diámetro del conducto de venteo, el valor de P_{red} puede aumentar hasta un orden de magnitud (10 veces), que suele ser suficiente para destruir completamente el recipiente protegido.

Existen dos factores que son los más importantes a la hora de considerar el efecto de los conductos de venteo en el proceso de venteo: la combustión de polvo dentro del conducto durante la explosión y la inercia de la masa de aire dentro del conducto antes de la explosión.

Durante la primera parte del proceso de venteo, el polvo sin quemar se expulsa al conducto situado delante del frente de la llama desde el recipiente. Cuando el frente de la llama entra en el conducto, el polvo empieza a arder dentro del conducto y genera productos de combustión adicionales. Estos productos de combustión se expanden en TODAS las direcciones, lo que ralentiza o incluso invierte el sentido de flujo saliente del recipiente y hace que se acumule presión en su interior.

La inercia del aire dentro del conducto también aumenta la presión de explosión dentro del recipiente protegido. Cuando el venteo de explosión se abre y los gases de combustión comienzan a fluir por el conducto, dichos gases deben expulsar todo el aire del conducto. Durante el tiempo necesario para expulsar el aire, la presión sigue creciendo dentro del recipiente, ya que los gases de combustión están obstruidos y no pueden alcanzar la atmósfera abierta. Si el conducto es largo, la masa de aire puede retrasar el venteo de los gases de combustión lo suficiente como para aumentar significativamente la presión dentro del recipiente.

La fricción del gas cuando fluye a través del conducto suele tener poco efecto sobre la explosión, salvo quizá posibles cambios de dirección u otras discontinuidades geométricas, en comparación con los efectos anteriormente señalados de la combustión en el conducto y la inercia del aire.

Como P_{red} sube de manera importante a medida que aumenta la longitud del conducto de venteo, normalmente los recipientes con una baja resistencia mecánica no se pueden proteger mediante el venteo a través de los conductos cuando la relación longitud/diámetro del conducto de venteo supera un valor de entre 1 y 2, a menos que el tamaño del venteo aumente proporcionalmente.

A pesar de que acoplar un conducto de venteo de explosión con una sección transversal menor que el venteo de explosión aumentará el valor de P_{red} (es decir, empeorará la situación), el uso de un conducto de venteo de explosión con una sección transversal mayor que la superficie de venteo de explosión no hará que disminuya el valor de P_{red} .

El software DustCalc de FM Global calcula fácilmente los efectos causados por los conductos de venteo.

3.1.9 Rearme de paneles de venteo de explosión (2.2.3.4 y 2.3.3.1.9)

Una vez que la combustión de polvo en el interior de una sala o un recipiente haya finalizado y ya no se produzcan gases para generar presión, los venteos de explosión dispuestos para volver a cerrarse por efecto de la gravedad lo harán. Los gases de combustión muy calientes atrapados en la sala o en el recipiente comienzan a enfriarse y, a menos que entre aire fresco en el cerramiento lo suficientemente rápido (por ejemplo, por efecto de una válvula de seguridad rompedora de vacío del tamaño adecuado), se generará una presión negativa, capaz de provocar daños en el recipiente o hacer que el equipo implomione. En salas o edificios, los daños por efecto de la presión negativa son menos graves, si bien posibles.

3.1.10 Efectos de la presión y las llamaradas de una explosión (2.3.3.1.11)

Una explosión de polvo genera una presión de corta duración y efectos de llamarada fuera del cerramiento. Existen algunos estudios que permiten estimar estos efectos; a continuación se sugieren algunas ecuaciones al respecto:

Estime los efectos de presión cercanos al venteo, y en dirección normal hacia este, con las siguientes ecuaciones:

Paso 1: Calcule la sobrepresión máxima ($P_{blast,max}$) generada por la explosión fuera del cerramiento venteado con la siguiente ecuación:

$$P_{blast,max} \text{ (bar man.)} = 0,2A_v^{0,1} V^{0,18} P_{red}$$

donde:

A_v es la superficie de venteo de explosión, en m^2 .

V es el volumen del cerramiento venteado, en m^3 .

P_{red} es la presión reducida en el cerramiento durante el venteo, en bar man.

Paso 2: calcule la distancia perpendicular (R_{max}) desde la abertura de venteo a $P_{blast,max}$ con la siguiente ecuación:

$$R_{max} \text{ (metros)} = 0,25 L_{f,max}$$

donde:

$L_{f,max}$ = es la longitud máxima del chorro de la llama, en m.

Paso 3: en distancias R superiores a R_{max} , calcule la presión de explosión específica de la distancia con la siguiente ecuación:

$$P_{blast} \text{ (bar man.)} = (R_{max}/R)^{1,5} P_{blast,max}$$

Nota 1: Estas presiones calculadas se producen muy cerca de la llamarada expulsada de una explosión venteada. Esto no es lo mismo que la presión de explosión general (P_{red}) que se produce en toda la sala o el edificio circundante. En un edificio grande, esta presión de choque puede ser la presión más grande que soportarán las paredes situadas cerca del equipo que experimenta la explosión, pero, por lo general, la presión en las paredes de una sala que contiene el equipo venteado dependerá de la cantidad de gases de combustión producidos por la explosión y que se expulsan a la sala. Dicha presión es esencialmente uniforme en toda la sala, independientemente de la distancia entre las paredes y el recipiente venteado.

Nota 2: Las ecuaciones para predecir los efectos de la presión son válidas únicamente cuando hay un único venteo de explosión. Si existen múltiples venteos que se abren en la misma dirección, calcule el valor de $P_{blast,max}$ de cada uno de ellos y, a continuación, sume los valores para calcular el efecto de presión conservador combinado.

3.1.10.2 Estime la longitud máxima del chorro de la llama en una dirección normal hacia el venteo con la siguiente ecuación:

$$L_{f,max} = 8 V^{(1/3)}$$

donde:

$L_{f,max}$ = longitud máxima del chorro de la llama, en m.

V = volumen del cerramiento venteado, en m^3 .

Esta ecuación es válida únicamente con polvo de tipo ST1 (es decir, $K_{st} \leq 200$) con un valor de $P_{red} \leq 1$ bar man. (14,5 psig) y un valor de $P_{stat} \leq 0,1$ bar man. (1,5 psig). No hay correlaciones publicadas referentes a situaciones fuera de los límites especificados. Se cree que los cambios en el valor de P_{stat} modificarán el tamaño de la llamarada prevista; sin embargo, los métodos de estimación actuales no han cuantificado tal efecto.

3.1.10.3 Estime la fuerza de retroceso de una explosión con las siguientes ecuaciones (2.3.3.1.18):

a) Para calcular la fuerza de retroceso dinámica, utilice la siguiente fórmula:

$$F_R = 119 A_v P_{red}$$

Unidades: F_R (kN), A_v (m²), P_{red} (bar man.)

$$F_R = 1,2 A_v P_{red}$$

Unidades: F_R (lb), A_v (in²), P_{red} (psig)

b) Para calcular la duración de esta fuerza de retroceso, utilice la siguiente fórmula (esto es válido únicamente en cerramientos sin conductos de venteo):

$$t_f = 10^{-4} K_{st} V / (P_{red} A_v)$$

Unidades: K_{st} (bar.m/s), V (m³), P_{red} (bar man.), A_v (m²), 10^{-4} (s²m⁻²) una constante

c) Como alternativa al diseño de anclaje de fuerza dinámica, utilice una fuerza estática equivalente (F_s) calculada con la siguiente fórmula:

$$F_s = 0,52 F_R$$

Unidades: kN o lb, como en la ecuación original

El software DustCalc de FM Global calcula fácilmente los efectos causados por la presión y las llamaradas.

3.1.11 Obstáculos fijos cercanos a la parte frontal de los venteos de explosión (2.3.3.1.12)

Un obstáculo fijo situado demasiado cerca de un venteo de explosión del equipo crea una resistencia significativa al flujo de salida libre de los productos de combustión procedentes del equipo venteado. Se cree que esto se debe principalmente a la combustión de polvo después de expulsarse del equipo protegido. Como la combustión se produce en la zona semiconfinada entre el recipiente y el obstáculo, se produce una situación parecida a una explosión secundaria. Esto tiene efectos significativos de contrapresión en la explosión del equipo. El estado del conocimiento relativo a este fenómeno es limitado y su efecto es imposible de cuantificar. Tampoco es posible proporcionar directrices sobre distancias seguras hasta obstáculos no planos, dada la complejidad de los efectos de las distintas geometrías que producen un confinamiento parcial. La única acción segura consiste en ubicar y orientar los venteos de explosión de forma que no apunten a superficies cercanas.

3.1.12 Distribución de los venteos de explosión (2.3.3.1.15)

Si un recipiente protegido tiene obstáculos importantes dentro, existen dos principios de explosión que explican la importancia de proporcionar un venteo de la explosión bien distribuido.

En primer lugar, si los gases que se dirigen hacia un venteo de explosión en un extremo del recipiente tienen que fluir a través de zonas obstruidas, los gases no fluirán tan rápidamente como lo harían si el volumen no estuviera obstruido. Por este motivo, el valor de P_{red} de la presión de explosión venteada puede aumentar por encima del nivel previsto.

En segundo lugar, si los gases que se dirigen hacia el venteo de explosión fluyen a través de un obstáculo de tamaño significativo, aumentará considerablemente la turbulencia en el interior del recipiente. Dado que la tasa de aumento de la presión de una explosión se incrementa según lo hace la turbulencia, los obstáculos pueden empeorar la explosión.

Los venteos distribuidos por todo el cerramiento ayudan a garantizar que los gases que se ventean durante la explosión toman el recorrido más corto para salir del cerramiento.

3.1.13 Presiones de servicio del colector de polvo (2.3.3.1.17)

El rango ordinario de presiones de servicio de los sistemas colector y de tratamiento del polvo es de +40 a -40 mbar (de +16 in de H₂O a -16 in de H₂O). En este rango no es necesario realizar ajustes en las directrices de venteo de explosión estándar.

3.1.14 Aislamiento de explosiones (2.3.3.2)

Cuando se produce una explosión en un cerramiento protegido por contención de la presión, tanto la presión como la llama (es decir, el polvo en combustión) se propagan por cualquier conducto abierto y conectado a otro cerramiento. Si ese segundo recipiente tiene también un diseño resistente a la presión, es probable que sea insuficiente debido a un efecto conocido como acumulación de la presión. La presión en el segundo recipiente aumentará antes de que llegue la fuente de ignición (es decir, el material en combustión), ya que la alteración de la presión se desplaza desde el primer recipiente al segundo a la velocidad del sonido, que suele ser mayor que la velocidad del frente de la llama.

Por lo tanto, cuando una explosión de polvo prenda en el segundo recipiente, la presión inicial estará muy por encima de la presión ordinaria (ambiente).

En una relación combustible-aire determinada, la presión sin venteo final de una explosión es directamente proporcional a la presión inicial. Por ejemplo, si la primera explosión presurizara previamente el segundo recipiente a 3 bar (44 psi) absolutos, la presión final de la explosión en el segundo recipiente aumentaría por un factor de tres. Si el polvo tuviera un valor de P_{max} de 9 bar abs., la presión sin venteo final de este ejemplo sería de 27 bar abs., muy por encima de la resistencia incluso del recipiente más resistente diseñado para la contención de la presión de explosión de polvo. En consecuencia, cuando se use la contención de explosiones como método de protección, es importante proporcionar aislamiento de explosiones para evitar que otra explosión haga que un recipiente se presurice previamente.

Si un recipiente protegido por contención de explosiones está conectado a un segundo recipiente protegido con venteo de explosión, existe un problema de protección que no está relacionado con la presurización previa, sino con la turbulencia que el frente de la presión crea y una fuente de ignición muy fuerte procedente del frente de la llama. El resultado es una explosión más rápida en el segundo recipiente, que no se ha tenido en cuenta en el diseño del venteo, y que puede provocar el fallo del segundo recipiente.

Estos efectos se producen en menor medida si los dos recipientes conectados están protegidos por venteo de explosión.

Por lo tanto, cuando se use el venteo de explosión como método de protección, es importante proporcionar aislamiento de explosiones para separar el recipiente venteado de cualquier recipiente conectado que esté protegido mediante dispositivos de contención de explosiones.

Los sistemas de transporte neumático de fase densa funcionan a una velocidad de transporte comparativamente baja (entre 1 y 5 m/s, o 200 y 1.000 ft/min), a una velocidad de carga de sólidos elevada y a alta presión (hasta 8,6 bar man., o 125 psig). Dada la elevada carga de polvo (muy por encima de la concentración mínima explosiva o CME), es poco probable que puedan propagar el frente de la llama de una explosión.

Los sistemas de transporte neumático de fase diluida funcionan a una velocidad elevada (entre 25 y 40 m/s, o 3.000 y 8.000 ft/min), a una velocidad de carga de sólidos baja y a baja presión (menos de un 1 bar man., o 15 psig).

3.1.15 Sistemas de aislamiento (2.3.3.3)

Cuando se utilizan dispositivos activos (en contraposición a pasivos) para el aislamiento de explosiones, es importante tener en cuenta la velocidad máxima a la que el frente de la llama de la explosión se traslada desde el punto de detección hasta el dispositivo de aislamiento. Los estudios científicos para estimar la propagación de la llama de las explosiones de polvo han dado pie a muchas publicaciones, pero ninguna solución sencilla. El fabricante del dispositivo de aislamiento tendrá que proporcionar la separación adecuada para dicho dispositivo.

3.1.16 Válvulas de flotador de acción rápida (2.3.3.3.4)

Estos dispositivos se accionan ante una presión diferencial causada por un frente de llama cercano o por la velocidad del gas en el conducto. Como resultado, la presión de alivio de venteo (P_{stat}) del equipo que experimenta la explosión debe ser lo suficientemente alta, en torno a 0,2 bar man. (3 psig), para garantizar que la válvula se cierre. Cuando se necesita un valor de P_{stat} inferior para proteger el equipo, este deberá contar con un sensor de explosión adicional y gas auxiliar para accionar la válvula.

Los datos relativos al dispositivo Ventex señalan que se necesitan unas distancias de separación mínima y máxima específicas para garantizar que el dispositivo se cierra correctamente y que no se ha producido ninguna transición a la detonación. Estas distancias se determinan mediante pruebas, pero son válidas en términos generales para una amplia gama de condiciones de funcionamiento. Si hay mezclas híbridas, ambas distancias se reducirán y las cifras exactas dependerán del diámetro de la válvula/tubería. Si se dispusiera de datos del fabricante, estos reemplazarían estas directrices generales.

Las válvulas Ventex son unidireccionales o bidireccionales, es decir, actuarán a partir de un evento de presión procedente de una única dirección o desde ambas direcciones. Una vez cerradas, permanecen bloqueadas en esa posición y deben restablecerse manualmente.

3.1.17 Funcionamiento en vacío (2.3.3.6)

Como la presión final tras una explosión es proporcional a la presión inicial (previa a la explosión), una explosión de polvo que suceda en un entorno a menos de 0,1 bar abs. (1,5 psia) producirá una presión de explosión absoluta de menos de 1 bar abs. (14,5 psia). Por lo tanto, no existen daños potenciales derivados de esa explosión.

Además, si un proceso funciona a una presión (absoluta) inferior a 50 mbar (0,73 psi), lo normal es que no pueda provocarse la ignición de una explosión.

3.1.18 Extinción de chispas frente a supresión de la explosión (2.3.4.1)

Los datos de siniestralidad han revelado que podría existir una concepción errónea sobre las capacidades de un sistema de extinción de chispas. Los sistemas de extinción de chispas son muy eficaces para reducir la frecuencia de las explosiones de polvo combustible, pero no afectan a la gravedad de una explosión y no son una alternativa al venteo de explosión, a los sistemas de bloqueo de explosiones o a los sistemas de supresión de explosiones.

Un sistema de extinción de chispas, también conocido como sistema de supresión de chispas, detecta y extingue las chispas o las brasas incandescentes aguas arriba del equipo colector de polvo para evitar que estas fuentes de ignición se desplacen al colector de polvo y causen una explosión. El sistema de detección utiliza un sensor de infrarrojos para detectar partículas que pasan a temperaturas elevadas. El extintor es una boquilla de agua pulverizada situada aguas abajo del detector.

El detector está pensado para funcionar independientemente del tamaño de las partículas calientes que pasan. Detecta partículas calientes tan pequeñas como una chispa o tan grandes como un trozo de cinta lijadora rota. Pese a esto, es posible que el extintor no funcione si las partículas son grandes. Cualquier chispa seguramente se extinguirá, pero es posible que esto no ocurra con un trozo grande de material en llamas o ardiendo de forma latente, en cuyo caso podría producirse una explosión si hay una nube de polvo inflamable en el equipo colector de polvo aguas abajo.

El sistema de extinción de chispas no reducirá la gravedad de la explosión resultante, por lo que deberá proporcionarse el mismo nivel de mitigación o protección contra explosiones en el equipo con riesgo de explosión de polvo.

Un sistema de extinción de chispas apaga una fuente de ignición, pero no es capaz de suprimir una explosión una vez que esta ha comenzado. Al evitar que una nube explosiva se incendie, la extinción de chispas impide que la explosión se produzca.

Un sistema de supresión de explosiones detecta las primeras fases de una explosión y la sofoca para evitar que la presión suba hasta un nivel en que el equipo pueda quedar dañado o destruido.

El sistema de supresión de explosiones reduce la gravedad de una explosión, mientras que el sistema de extinción de chispas solo reduce la frecuencia.

La única finalidad de un sistema de extinción de chispas es acabar con una situación de ignición concreta: pequeñas partículas calientes que se trasladan a un colector de polvo, donde existe el riesgo de que una nube de polvo combustible prenda. Existen otras situaciones de ignición en las que el sistema de extinción de chispas no puede influir. Por ejemplo:

- Aspiración de partículas metálicas (p. ej., un tornillo o un clavo) en el sistema colector de polvo. El metal crea chispas cuando impacta en los conductos o en el equipo de metal posterior al sistema de extinción de chispas.
- Fuentes de ignición producidas aguas abajo del sistema de extinción de chispas, por ejemplo, superficies calientes o labores de corte y soldadura sobre el equipo colector de polvo o cerca de este.

En la mayoría de los procesos, el desplazamiento de pequeñas partículas calientes desde el proceso de producción de polvo al sistema colector de polvo es, con diferencia, la fuente de ignición de explosión de polvo más común. Los sistemas de extinción de chispas instalados pueden actuar semanalmente o con más frecuencia sin incidentes, lo cual pone de manifiesto la capacidad de estos sistemas para detectar y extinguir sistemáticamente incluso las partículas calientes más pequeñas.

Se han producido siniestros en los que algún material ardiendo ha atravesado la zona de supresión de chispas hasta llegar al equipo colector de polvo y ha desencadenado una explosión. Es posible que este material en combustión haya conseguido llegar hasta ahí debido a su tamaño o forma, o a un defecto en el equipo de extinción de chispas o en su instalación. Ante la inexistencia o escasa idoneidad de otras funciones de limitación de daños, como los sistemas de bloqueo o de venteo de explosión, las explosiones consiguientes acabaron dañando el equipo colector. Además, el material ardiendo se vio empujado (expulsado) hacia zonas de trabajo, ya sea hacia delante a través de un retorno de aire caliente o hacia atrás, a los puntos colectores de polvo. Un venteo de explosión adecuado, combinado con distintas protecciones en el retorno de aire caliente (recomendadas tanto en el presente documento como en la ficha técnica 7-73, *Dust Collectors and Collection Systems*), podría haber evitado que el material en combustión se expulsara hacia las instalaciones.

3.1.19 Energía mínima de ignición (EMI) (2.3.4.2)

La gran mayoría de los tipos de polvo presenta valores de EMI por encima de 10 mJ, por lo que no es necesario realizar en el polvo pruebas rutinarias de EMI. Estas pruebas se suelen llevar a cabo solo cuando hay motivos para sospechar que un determinado polvo puede ser especialmente susceptible a la ignición debido a la electricidad estática. Entre los protocolos de ensayo de EMI se incluyen ASTM E2019 y EN 13821, además de otros equivalentes a nivel internacional. Cualquier resultado de prueba que revele una EMI igual o inferior a 10 mJ debe interpretarse como una prueba de su susceptibilidad de ignición por electricidad estática.

Se pueden producir cargas electrostáticas capaces de generar chispas cuando el polvo aislante se transfiere a silos o contenedores, o cuando hay revestimiento aislante (plástico, por ejemplo) que cubre superficies metálicas (conductos metálicos forrados). Las cargas en la superficie de una pila de polvo aislante pueden crear descargas de cepillo que suelen estar limitadas a 20 mJ y que no es probable que prendan ningún polvo combustible típico. Las cargas desarrolladas en superficies con revestimiento pueden propagar descargas de cepillo que pueden liberar suficiente energía (cientos de mJ) como para prender polvo combustible. Si se dan estas condiciones, debe realizar una evaluación un experto en electrostática.

3.1.20 Separadores de materias extrañas, separadores magnéticos y otros (2.3.4.3)

El uso de separadores aguas arriba de todo el equipo que impacta mecánicamente en el material de proceso impide que entren en el equipo objetos metálicos y otros objetos extraños. Sin esos separadores, existe el riesgo de que entren partículas metálicas u otro material en el equipo y generen chispas por impacto o por fricción capaces de inflamar una nube de polvo.

3.1.21 Lado limpio frente a lado sucio de los colectores de polvo (2.4.2)

La distinción entre los lados de aire limpio y sucio no es importante a la hora de considerar situaciones de explosión. Las presiones generadas en una explosión rompen con frecuencia el medio filtrante a medida que la explosión se propaga por los lados limpio y sucio. Además, es posible que se produzca una rotura del medio filtrante incluso antes de la explosión (por ejemplo, si se rompe la manga), lo que hace que el polvo entre en el lado limpio.

La cuestión acerca de dónde colocar los venteos en relación con los lados limpio y sucio es teórica y práctica. La mayoría de las pruebas se realizan en cerramientos sin obstáculos internos y con el venteo lejos de la fuente de ignición.

Las mangas u otros obstáculos pueden alterar la explosión y el proceso de venteo. Las mangas suelen fallar en las primeras fases de la explosión y tienen un efecto menor en el proceso de venteo, pero la lámina del tubo que divide los lados limpio y sucio puede ser un impedimento mayor. La ecuación que especifica la cantidad mínima de venteo de explosión que debe ubicarse en el lado sucio se basa en la provisión de un venteo de explosión completamente adecuado para una explosión en el lado sucio si las mangas no llegan a dañarse e impiden que los gases se expulsen a través del lado limpio del colector.

3.1.22 Venteo de explosión en ciclones (2.4.2.3)

Los cálculos de venteo de explosión de un ciclón basados en las proporciones de diseño típicas arrojan que una salida de gas típica cuyo diámetro es la mitad del de un ciclón proporciona una superficie de venteo de explosión adecuada para polvo con valores de K_{st} de hasta 80, suponiendo que existe una resistencia de presión de unos 0,3 bar man. (4,4 psig). Los tipos de polvo con un valor de K_{st} tan bajo como 80 suelen ser bastante gruesos (por ejemplo, serrín, harina de maíz), tienen un contenido de partículas volátiles muy bajo (por ejemplo, carbón vegetal) o tienen una energía de combustión muy baja (por ejemplo, polvo de hierro, PRF con un alto contenido de fibras inertes).

La idoneidad del venteo de explosión no se puede dar por sentada si el ciclón tiene un conducto con una relación longitud/diámetro > 1 que se extiende sobre la salida de gas. Al igual que con cualquier recipiente provisto de un conducto en el venteo de explosión, será necesario calcular la presión de la explosión para cuantificar el efecto.

Debido a los efectos significativos de la contrapresión producidos por cambios de dirección en los conductos de venteo, cualquier salida de gas que tenga un conducto de 180° (cuello de cisne) probablemente carezca de un venteo de explosión adecuado. Si es posible, sustituya el cuello de cisne por una protección de lluvia que cubra una salida de gas abierta.

Las proporciones de ciclón típicas incluyen un diámetro D, una altura de cilindro y de cono de 2 D cada una y un diámetro de salida de gas de 0,5 D.

3.1.23 Filtros de mangas de colectores de polvo «conductores» (2.4.3.1)

Los filtros de mangas «conductores» suelen tener alambre fino trenzado o sujeto en la malla. La red de cables conductores está conectada a una o más tiras o cables de puesta a tierra, que deben conectarse a la estructura del colector de polvo. Puesto que no existe ningún mecanismo fiable para migrar cargas desde la superficie del material del filtro de mangas no conductor al cable conectado a tierra más cercano, pueden darse diferencias cuantificables (y, a veces, significativas) entre la superficie del filtro de mangas y los cables.

Nunca se ha establecido la necesidad de disponer de filtros de mangas especiales para evitar la ignición del polvo debido a la electricidad estática. Con los filtros de mangas ordinarios no conductores, se puede acumular electricidad estática en toda la superficie de un filtro de mangas, pero una descarga estática solo puede liberar la energía acumulada en una zona muy pequeña. Es poco probable que esta liberación de energía sea suficiente para inflamar incluso los tipos de polvo más sensibles a la ignición.

Hay otro problema relacionado con los filtros de mangas «conductores». Existe la posibilidad de que las tiras de puesta a tierra se separen y conviertan el filtro de mangas en un enorme condensador. Todos los cables integrados que recogen cargas de la superficie del filtro de mangas podrían liberar repentinamente suficiente electricidad

estática como para inflamar una nube de polvo. Si los filtros de mangas se agitan repetidamente o se les aplican chorros de aire para limpiarlos, una o más tiras de puesta a tierra se podrían romper o desconectar. Es necesario realizar labores de mantenimiento e inspección para evitar que esto ocurra.

3.1.24 Colectores de polvo sin cerramiento (2.4.4)

Los colectores sin cerramiento descargan el aire sucio que hay dentro de las mangas de tela donde se recoge el polvo fugitivo, y el aire «limpio» escapa al exterior, lo que aumenta la posibilidad de acumulaciones de polvo fugitivo en el entorno, de ahí que los sistemas se usen de manera discontinua u ocasional (consulte la figura 11).

Los colectores de polvo sin cerramiento no están diseñados para su uso con la mayoría de los tipos de polvo recogidos de equipos de procesos u otras fuentes de polvo aireadas. El polvo fino cegará rápidamente el filtro, lo que reduce el rendimiento y puede provocar la liberación de polvo fugitivo al entorno.

Dado que normalmente solo la manga filtrante evita la liberación de polvo combustible, todo lo que esté a menos de 3 m (10 ft) podría considerarse una zona de clase II, división 2 (zona 22) que requiere equipo eléctrico clasificado para atmósferas explosivas. Una solución más adecuada sería limitar los equipos eléctricos ordinarios en la zona restringida [consulte la figura 6.10(c) relativa a la NFPA 499-2013].

Muchos colectores de polvo sin cerramiento se acoplan en varios filtros de mangas con contenedores, como en la figura 11. El límite de 140 m³/min (5.000 ft³/min) hace referencia al caudal de aire total que atraviesa el conjunto, no a una sola manga con contenedor de material recogido.

El interior de la manga podría entrañar un riesgo de explosión de polvo, pero las mangas fallarían inmediatamente si la nube contenida se inflamara y el resultado sería, por lo general, un incendio con una llamarada limitada. El venteo de explosión no presenta garantías ni resulta práctico. De forma similar, la construcción abierta permitiría controlar cualquier incendio que pudiera producirse mediante los rociadores de techo, si los hubiera.



Figura 11. Ejemplo de colector sin cerramiento

3.1.25 Conductos de conexión (2.5)

El polvo se transporta en conductos, ya sea como parte de un sistema de control de polvo fugitivo o para trasladar el producto de una parte del proceso a otra. La transferencia de polvo fugitivo se hace casi siempre a una concentración inferior a la CME, mientras que la transferencia durante el proceso puede ser mucho mayor que la CME. La transferencia durante el proceso puede denominarse transferencia de fase densa.

Para ser verdaderamente conscientes del peligro, es necesario conocer las condiciones de la transferencia. Estas se pueden determinar conociendo la cantidad procesada/recolectada durante un período de tiempo, o bien, muestreando o supervisando el caudal real en el conducto. A veces, el personal de seguridad e higiene en el trabajo en plantilla puede facilitar estos datos.

El riesgo del conducto puede verse influido por las velocidades de transferencia reales o por el polvo que se asienta y acumula debido a un caudal insuficiente en el conducto. Es importante que esto no suceda; para controlarlo, hay que mantener

una velocidad de aire suficiente, normalmente en torno a 1.070-1.220 m/min (3.500-4.000 ft/min). El polvo que se ha acumulado puede volver a ser arrastrado por la onda de presión procedente de una explosión y crear concentraciones combustibles puntuales que se mueven junto con la onda de presión y se inflaman por el frente de la llama que le sigue. Tras una propagación considerable, este chorro de llama turbulento se convierte en una fuente de ignición muy potente capaz de destruir equipos aparentemente bien protegidos.

Una cantidad asombrosamente pequeña de polvo depositado puede propagar una explosión. En el caso de un conducto circular de diámetro «D» con una capa de polvo con un grosor «h» asentada en 1/4 de la circunferencia interior (es decir, en la parte inferior), la concentración de polvo dispersado de forma homogénea a lo largo de la sección transversal del conducto sería $C = \rho_{\text{bulk}} h/D$. A modo de ejemplo, un polvo con una densidad aparente de 500 kg/m³ (31 lb/ft³), un grosor de capa de solo 0,2 mm (1/125 in) y un conducto de 0,2 m (8 in) de diámetro sería capaz de generar una concentración de polvo de 500 g/m³. Esta concentración está muy por encima de la CME de prácticamente cualquier polvo y, por lo tanto, puede propagar una explosión.

Es muy probable que el polvo asentado no se disperse de forma homogénea por todo el conducto, pero las investigaciones realizadas por la Oficina de Minas de EE. UU. han puesto de manifiesto que podrían propagarse explosiones a través de los conductos incluso con promedios de concentración de polvo tan bajos como la mitad de la CME. Todo lo que hace falta para que se produzca una propagación es un recorrido continuo de mezcla que esté por encima de la CME. Esta condición puede darse aunque no haya suficiente polvo para llenar todo el volumen del conducto con una mezcla por encima de la CME. Por lo tanto, incluso una cantidad pequeña de polvo puede bastar para crear una explosión que se propague, de modo que la velocidad del aire a través del conducto debe ser lo suficientemente alta como para evitar que el polvo transferido se asiente.

El venteo de explosión en los conductos no se proporciona para salvar el conducto (que suele ser de poco valor y se sustituye fácilmente), sino para reducir la violencia de una posible explosión que se propague por este. Esto no haría que la propagación de la explosión se detuviera, pero conseguiría que un equipo conectado que contenga polvo suspendido esté expuesto a una fuente de ignición menos energética. Diseñar el conducto para que falle a baja presión en lugar de instalar venteos de explosión podría ser una alternativa aceptable cuando no existe ninguna exposición a equipos.

Puede que se necesiten sistemas de aislamiento de explosiones para conectar los conductos en los que las consecuencias de un suceso sin protección en el equipo o de un retorno de la llama hacia un edificio sean inaceptables. Por ejemplo, una lijadora de paneles de gran tamaño puede tener seis puntos colectores de polvo, tres en la parte superior y tres en la inferior, todos ellos unidos a un mismo conducto. No es necesario un dispositivo de aislamiento para cada tubo colector. Lo mejor sería proporcionar aislamiento de explosiones en el conducto principal después de que salga del edificio, para evitar que una explosión en el colector de polvo se propague de vuelta hacia la lijadora.

3.1.26 Silos (2.6)

Los silos también pueden suponer un riesgo de explosión de polvo, incluso cuando se usan con material granular con una porción muy pequeña de partículas finas. A medida que el material grueso se va transfiriendo constantemente al silo, irá cayendo al fondo de este, pero el material más fino y explosivo permanecerá en suspensión. Si las operaciones de transferencia prosiguen el tiempo suficiente, la concentración de polvo combustible en suspensión superará la CME y provocará un riesgo de explosión.

Cuando un colector de polvo se monta directamente en un silo (es decir, mediante un tubo de conexión corto con un diámetro lo suficientemente grande), cualquier explosión que se produzca en el colector de polvo creará los mismos efectos de explosión de silo que si la explosión se originara en el interior del propio silo. Por tanto, el colector de polvo se puede considerar como parte del silo. Siempre y cuando el tamaño del venteo de explosión proporcionado en el conjunto de silo y colector de polvo se base en la suma de ambos volúmenes, el venteo de explosión deberá ser adecuado, independientemente de si la explosión se origina en el silo o en el colector de polvo conectado.

Si el colector de polvo está separado del silo por un tubo pequeño o alargado, el silo y el colector de polvo ya no actúan como un único volumen durante una explosión. Si una explosión se origina en un colector de polvo que no tiene venteo de explosión propio, el chorro de llama se propagará por el tubo de conexión, lo que inflamará la nube de polvo combustible dentro del silo. Esto provocará una explosión mucho más violenta en el silo que si la explosión de silo se iniciara mediante una fuente de ignición convencional (más débil).

Los cañones de aire utilizados para dividir material apelmazado pueden dispersar partículas finas en el material a granel en el espacio vacío del silo. Incluso cuando el porcentaje de partículas finas es muy bajo (por ejemplo, 1 % a 2 %), unos chorros de aire repetitivos las concentrarán en la parte superior del lecho. con cada disparo del cañón de aire se acumulan más partículas finas en la parte superior del lecho y se produce una mayor concentración de polvo en el espacio superior. Solo falta una fuente de ignición para que se produzca una explosión de polvo potencialmente grave.

Además, algunos materiales combustibles como el carbón, el grano y la madera son susceptibles de experimentar un calentamiento espontáneo, y la entrada de aire durante un período de tiempo prolongado puede aumentar la probabilidad de que se produzca ese calentamiento espontáneo. El aire que se introduce en la combustión incandescente podría avivar la llama o provocar una explosión de polvo.

Entre las soluciones alternativas a los cañones de aire están el uso de varas vibratorias insertadas temporal o permanentemente en la parte inferior del silo o el empleo de bocinas acústicas y lanzas.

3.1.27 Elevadores de cangilones (2.7)

Existen dos configuraciones de elevadores de cangilones, con carcasa simple o doble: en la de carcasa simple, los cangilones se mueven hacia arriba y hacia abajo en la misma carcasa (cerramiento) con un cabezal (parte superior) y un pie (parte inferior) comunes, mientras que en la de carcasa doble hay una carcasa independiente para los cangilones que se mueven hacia arriba y hacia abajo, pero el cabezal y el pie siguen siendo comunes.

Aunque el material combustible a granel contenga un porcentaje muy pequeño de partículas finas mezcladas con material demasiado grueso como para constituir un riesgo de explosión de polvo, la manipulación de material a granel puede entrañar un riesgo de explosión en el cerramiento de un elevador de cangilones. Debido al alto nivel de turbulencia dentro del cerramiento del elevador de cangilones, cualquier partícula fina quedará en suspensión fácilmente. Además, dado que se siguen añadiendo más partículas finas al espacio de aire del elevador, muy pocas de las cuales caen hacia abajo, la concentración puede superar la CME y entrañar un riesgo de explosión de polvo.

Un ejemplo de esto son los grañones de soja sin triturar, que no son explosivos. La mayor parte de este producto consiste en material muy grueso (con un tamaño medio de partícula de aproximadamente 1.000 micras), aunque aproximadamente el 3 % de las partículas finas son inferiores a 75 micras. En un caso concreto, después de transportar este producto en un elevador de cangilones durante varios minutos, las partículas finas se liberaron y se produjo un incendio y una explosión.

3.1.28 Equipo de reducción de tamaño (amoladoras, pulverizadores, molinos de martillo, etc.)

El equipo de reducción de tamaño presenta el riesgo inherente de impacto mecánico ante la presencia de polvo combustible. El impacto mecánico puede generar calor por fricción e impacto, y podrían producirse chispas si entra material metálico por error en la máquina. El resultado pueden ser partículas incandescentes que salen del equipo para convertirse en una fuente de ignición en los equipos que se encuentra aguas abajo, o la propia ignición de la nube de polvo en el equipo. Estas máquinas suelen estar dotadas de una construcción muy sólida y pueden resistir una explosión interna sin daños.

Normalmente, no se necesita venteo de explosión, pero conviene tener en cuenta la propagación de explosiones a otras partes de la instalación, de modo que puede que sean necesarias técnicas de aislamiento de explosiones.

Realice labores de mantenimiento en estos dispositivos con regularidad para garantizar una lubricación adecuada, que se mantienen las separaciones mínimas adecuadas y que no se acumulan residuos ni polvo que puedan inflamarse y afectar al correcto funcionamiento.

3.1.29 Fabricación aditiva (impresión 3D) (2.10)

La fabricación aditiva, más comúnmente conocida como impresión 3D, es cada vez más importante en la fabricación de piezas complejas. En este sentido, se están fabricando componentes para diversos servicios, desde juguetes hasta la industria aeroespacial.

Las figuras 12, 13 y 14 muestran representaciones esquemáticas de las principales categorías tecnológicas y sus características. La impresión 3D a la que remite la figura 14 es más representativa de impresoras personales que industriales.

La fusión del lecho de polvo parece ser el método más común utilizado con polvo metálico. Esto conlleva usar datos de diseño digital para crear un componente capa a capa, depositar alternativamente una capa de material de 20 a 100 micras de grosor (0,02 a 0,1 mm, o 0,0008 a 0,004 in) y, a continuación, fusionar el patrón del componente en la capa. Esta secuencia se repite hasta que la pieza esté terminada. En el caso del polvo metálico, la fusión se realiza con un haz de electrones o láser, mientras que los polímeros o plásticos pueden fusionarse con un láser o pulverizando líquido aglutinante sobre la capa de polvo.

La figura 15 es un esquema que representa la tecnología de lecho de fusión de sinterización selectiva por láser (SLS) que crea el producto real. La distribución de las capas de polvo se realiza mediante una barra esparcidora justo por encima de la superficie de la plataforma de producción o de la capa anterior.

Los procesos de deposición de materiales utilizan polvo o métodos de extrusión para crear el diseño capa a capa. Una técnica utiliza la dispersión selectiva de un polvo a través de un chorro de aerosol, seguida de la fusión con calor o con un haz de electrones (rociado de material). Estos procesos utilizan pequeños «disparos» de material individuales y no suelen generar nubes de polvo en el equipo.

Por último, se pueden usar resinas plásticas líquidas en una piscina, donde el mecanismo de perfilado de la forma usa haces de luz (láser, UV) para fusionar el polímero con la forma necesaria (estereolitografía). En uno de los métodos se utilizan resinas líquidas con alto punto de inflamación (por encima de los 100 °C, o 212 °F) y fluidos de limpieza con un punto de inflamación moderado (85 °C, o 185 °F).

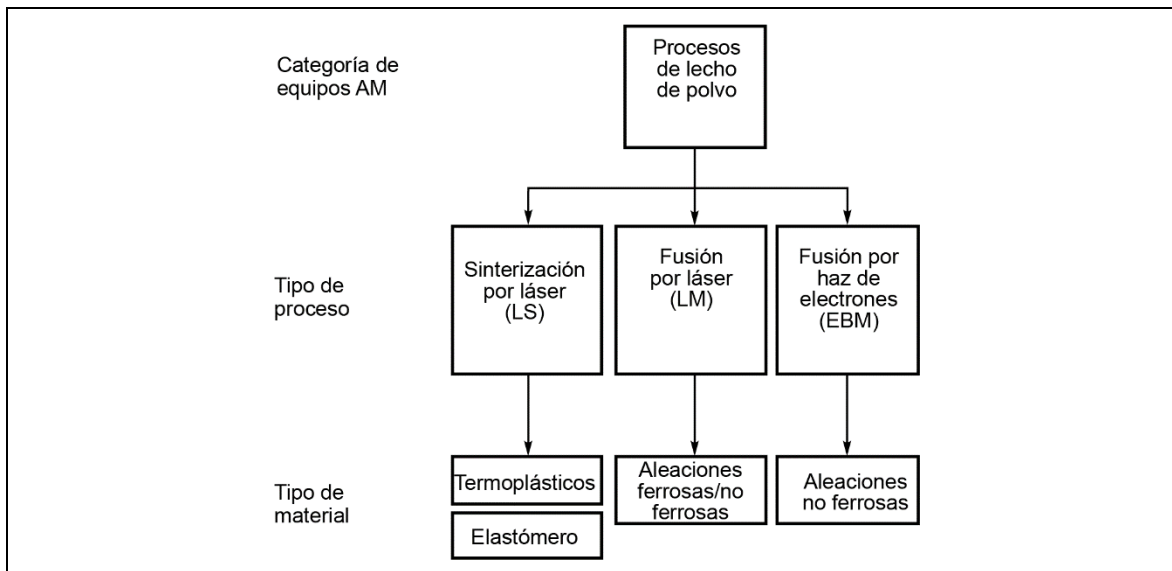


Figura 12. Procesos de lecho de polvo

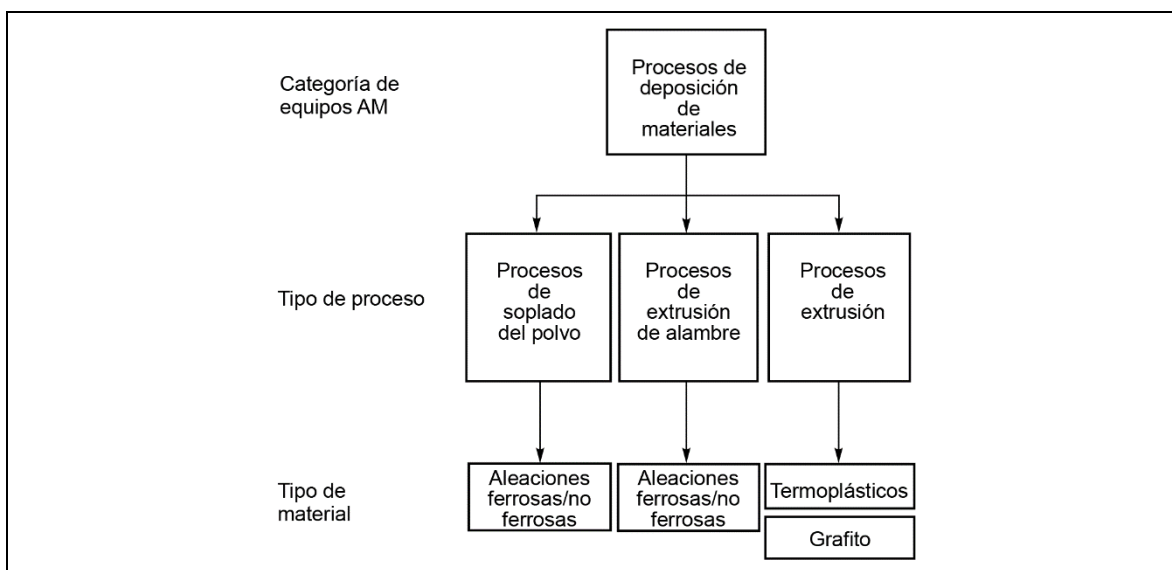


Figura 13. Procesos de deposición de materiales

El material de construcción puede ser metal, plástico, cerámica o vidrio en polvo muy fino. Entre los tipos de polvo de aleación de metal de uso común están el cromo-cobalto, aluminio-titanio, magnesio, acero inoxidable (hierro y cromo, más otros aditivos menores) e Inconel (níquel y cromo con hierro y otros metales como aditivos menores). La explosividad del material (K_{St}) varía en función del metal o la aleación en particular y, por lo general, debe considerarse polvo combustible hasta que se demuestre lo contrario mediante ensayo.

En la figura 16 se muestran ejemplos de impresoras industriales típicas. Los modelos ProX 300 y Concept M2 tienen una cámara de construcción (para la parte de impresión) de aproximadamente 250 x 250 x 300 mm (10 x 10 x 12 in). Una impresora industrial puede costar 0,5 millones de USD o más cada una.

3.1.29.1 Posibles riesgos

Desde el punto de vista de la seguridad personal, pueden ser problemáticos los humos y las partículas finas que requieran una ventilación adecuada, los materiales corrosivos e irritantes que requieran llevar algún tipo de equipo de protección personal (guantes, gafas, etc.), las superficies calientes, la luz láser o UV y la alta tensión eléctrica.

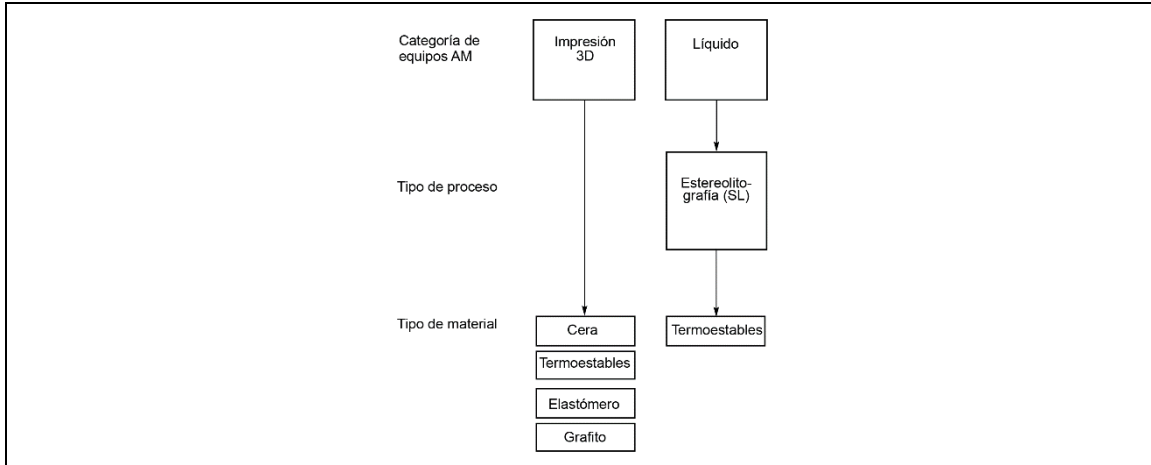


Figura 14. Impresión 3D y procesos de líquidos

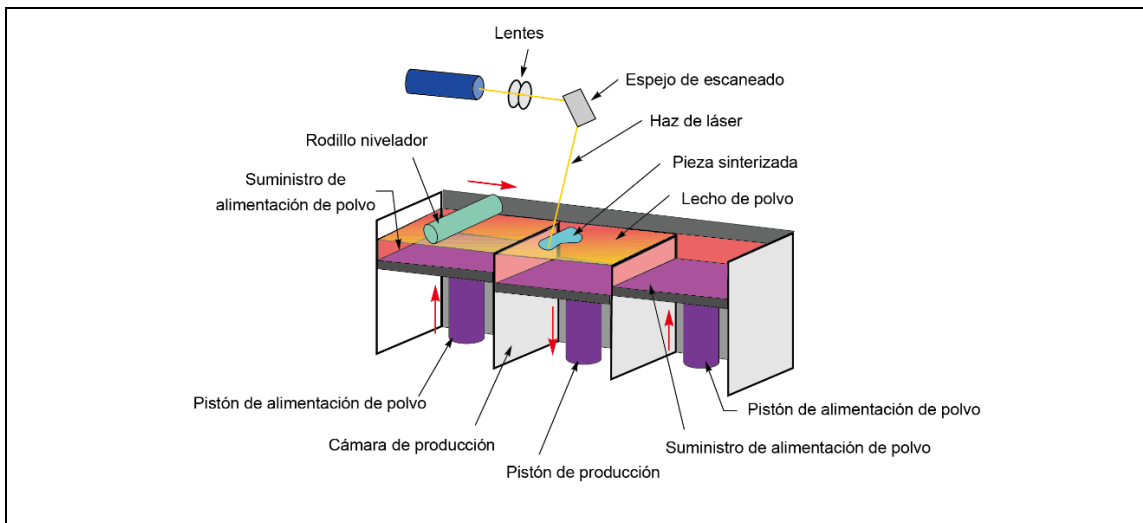


Figura 15. Concepto de diseño de sinterización selectiva por láser (SLS) (Chemical Engineering Progress, mayo de 2014)

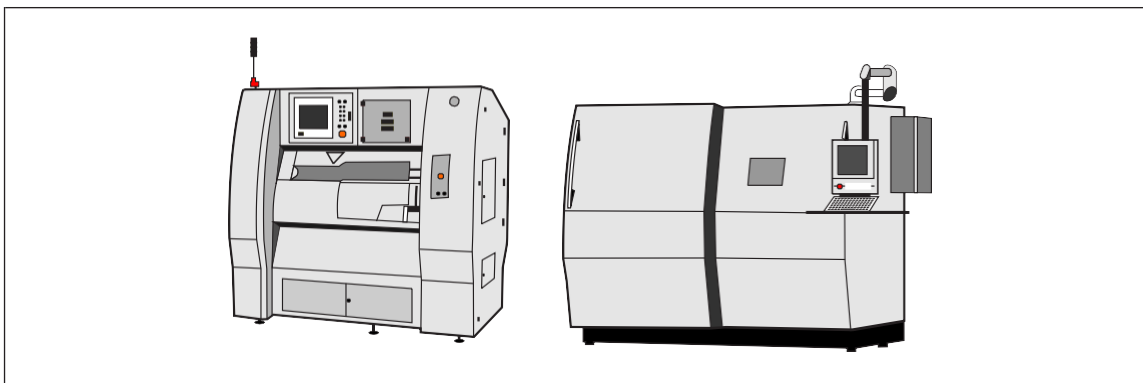


Figura 16. Sistemas 3D industriales: impresoras láser ProX 300 y Concept M2 (fuente: folletos de los fabricantes)

Los principales riesgos para las instalaciones son el polvo combustible manipulado en forma de polvo fino (a menudo, de 50 micras o menos) y el líquido que arde utilizado por algunos sistemas. Aquí solo se abordan los riesgos asociados a las operaciones relativas al polvo, con especial atención al polvo metálico.

Los procesos basados en metales tienen lugar en ambientes hipóxicos (menos del 1 % de O₂) para fines de calidad del producto y, por lo tanto, no presentan un riesgo de explosión en la cámara de producción ni en el sistema de recirculación de la atmósfera inerte. Puede estar incorporados en el sistema filtros

de panel o cartuchos, que presentan una composición principal o completamente combustible. La mayoría de los filtros se utilizan durante dos o tres ciclos de fabricación y, tras ello, se sustituyen. En algunos sistemas, los humos del proceso láser se consideran como un «condensado de metal altamente inflamable», que requiere una manipulación y precauciones especiales para evitar la ignición, lo que podría dar lugar a una combustión espontánea en los filtros al extraerlos y exponerlos al aire.

Dado que la mayoría de las máquinas industriales actuales solamente requieren pequeñas cantidades de material (unos cuantos cientos de kilogramos/libras como máximo), el polvo de proceso se manipula en pesados contenedores de conglomerado o botellas de plástico de un tamaño no superior a 7,6 L (2 gal). Se puede producir una acumulación estática al transferir este polvo, y los fabricantes suelen recomendar la conexión equipotencial y la puesta a tierra del personal, los contenedores y las máquinas en el transcurso de estas operaciones. En cuanto a la manipulación de materiales, dada la escala actual a la que estos sistemas se utilizan, resulta más práctico controlar las fuentes de ignición mediante la puesta a tierra, la conexión equipotencial, etc., que con la inertización de la operación.

Los equipos a escala de producción probablemente requerirán otros métodos de manipulación de materiales y deberán evaluarse en función de las propiedades del polvo que interviene, como sucede con otros tipos de polvo combustible.

En el proceso de limpieza de la cámara de producción normalmente se usarían aspiradoras portátiles, que deben contar con la calificación correspondiente para operaciones peligrosas en las que intervenga polvo de plástico o metal combustible.

Las piezas completadas se extraen del equipo y el exceso de polvo se quita manual o mecánicamente, o se expulsa con aire de la planta y, a continuación, se traslada a otros procesos de acabado. Algunos plásticos se limpian con chorros de agua a alta presión en una caja de tipo guantera. La purga de aire podría suponer un pequeño riesgo local de incendio de polvo, o un sistema colector de polvo asociado podría entrañar un riesgo de explosión de polvo.

3.1.29.2 Protección

Como se ha indicado anteriormente, las máquinas que manipulan polvo metálico combustible funcionan en atmósferas inertes y no plantean riesgo alguno de explosión de polvo. Habría que evaluar las máquinas que utilizan otros tipos de polvo combustible para entender cómo funciona el proceso y si existe la posibilidad de que se creen nubes de polvo combustible importantes.

Los cerramientos de la máquina contienen por completo el polvo combustible y, por lo tanto, no se necesitan equipos eléctricos para ubicaciones peligrosas en los alrededores.

Si las operaciones de recolección de polvo se llevan a cabo mediante tamizado o cualquier otro método, deberán realizarse en campanas adecuadamente ventiladas. De igual modo, la limpieza del producto para eliminar el polvo de los espacios interiores también debe realizarse dentro de campanas o cerramientos adecuados.

Limpie el polvo utilizando aspiradoras portátiles diseñadas adecuadamente para el servicio en cuestión. No existen protocolos claros para la certificación de aspiradoras diseñadas para la recolección de polvo metálico u otro polvo combustible. Con todo, parece que la mayoría están clasificadas para su uso en zonas peligrosas con polvo del mismo modo que otros equipos eléctricos.

Existe una norma, EN 60335 Parte 2-69, *Requisitos particulares para aspiradores que funcionan en mojado o en seco*, que aborda en términos generales el problema de la certificación de equipos para su funcionamiento en zonas tipo 22. En el anexo CC de dicho documento se tratan explícitamente las modificaciones de la norma principal necesarias para obtener la calificación de uso en una zona 22. En la sección 24.1 del anexo CC se estipula que «los componentes ubicados dentro de cerramientos que contienen polvo combustible recolectado serán adecuados para la zona 20».

4.0 REFERENCIAS

4.1 FM Global

Ficha técnica 1-44, *Damage Limiting Construction*
Ficha técnica 5-1, *Electrical Equipment in Hazardous Locations*
Ficha técnica 5-8, *Static Electricity*
Ficha técnica 5-20, *Electrical Testing*
Ficha técnica 6-9, *Industrial Ovens and Dryers*
Ficha técnica 7-10, *Wood Processing and Woodworking Facilities*
Ficha técnica 7-17, *Explosion Protection Systems*
Ficha técnica 7-32, *Operaciones con líquidos que arden*
Ficha técnica 7-59, *Inerting and Purging of Tanks, Process Vessels and Equipment*
Ficha técnica 7-73, *Dust Collectors and Collection Systems*
Ficha técnica 7-75, *Grain Storage and Milling*
Ficha técnica 7-78, *Industrial Exhaust Systems*
Ficha técnica 10-3, *Gestión de trabajos en caliente*

4.2 Otras referencias

Air Movement and Control Association (AMCA). *Classifications for Spark Resistant Construction*. AMCA 99040186, última edición.

American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Method for Limiting Oxygen (Oxidant) Concentration of Combustible Dust Clouds. E2931.

American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts*. Norma E1515, última edición.

American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Method for Minimum Ignition Energy of a Dust Cloud in Air*. ASTM E2019, última edición.

American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise of Combustible Dusts*. Norma E1226, última edición.

Bhatia, S. K. y S. Sharma. «3D Printed Prosthetics Roll off the Presses». *Chemical Engineering Progress*, mayo de 2014.

Comité Europeo de Normalización (CEN). *Determinación de las características de explosión de nubes de polvo*.
- *Parte 1: Determinación de la presión máxima de explosión p_{max} de nubes de polvo*. EN 14034-1.

Comité Europeo de Normalización (CEN). *Determinación de las características de explosión de nubes de polvo*.
- *Parte 2: Determinación de la velocidad máxima de aumento de presión de explosión $(dp/dt)_{max}$ de nubes de polvo*. EN 14034-2.

Comité Europeo de Normalización (CEN). *Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 3: Determinación del límite inferior de explosividad LIE de nubes de polvo* (que también se conoce como concentración mínima explosiva o CME). EN 14034-3.

Comité Europeo de Normalización (CEN). *Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 4: Determinación de la concentración límite de oxígeno CLO de nubes de polvo*. EN 14034-4.

Comité Europeo de Normalización (CEN). *Protección y prevención contra incendios y explosiones para elevadores de cangilones*. TR16829 (preliminar).

Comité Europeo de Normalización (CEN). *Aparatos electrodomésticos y análogos - Seguridad, Parte 2-69: Requisitos particulares para aspiradores que funcionan en mojado o en seco, incluyendo los cepillos con motor para uso industrial y comercial*. EN 60335-2-69.

Comité Europeo de Normalización (CEN). *Atmósferas potencialmente explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Determinación de la energía mínima de inflamación de las mezclas polvo/aire*. EN 13821.

Holbrow, P., G. A. Lunn y A. Tyldesley. «Explosion Venting of Bucket Elevators». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 15, N.º 5, 2002.

Organización Internacional de Normalización (ISO). *Explosion Protection Systems – Part 1: Determination of Explosion Indices of Combustible Dusts in Air*. ISO 6184/1, última edición.

National Fire Protection Association (NFPA). *Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installation in Chemical Process Areas*. NFPA 499, última edición.

National Fire Protection Association (NFPA). *Recommended Practice on Static Electricity*. NFPA 77, última edición.

National Fire Protection Association (NFPA). *Standard on Explosion Prevention Systems*. NFPA 69, última edición.

National Fire Protection Association (NFPA). *Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting*. NFPA 68, última edición.

University of Exeter, Centre for Additive Layer Manufacturing. What is additive layer manufacturing? <http://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/calm/whatis>. Consultado el 16 de octubre de 2016.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Directriz de la VDI 2263, parte 8.1, *Dust Fires and Dust Explosions; Hazards, Assessment, Protective Measures; Fire and Explosion Protection on Elevators*. 2011.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Directriz de la VDI 3673, parte 1, «*Pressure Venting of Dust Explosions*». Última edición.

ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aislamiento de explosiones: sistema o dispositivo único que evita la propagación de los efectos de una explosión de un volumen a un volumen adyacente.

A_v: superficie de venteo de explosión.

Bar abs.: bar, absoluto (unidad de presión).

Bar man.: bar, manométrico (unidad de presión)

Cerramiento o recipiente frágil: estructura que no puede soportar presiones de explosión superiores a 0,2 bar man. (3 psig) sin resultar dañado ni destruido. Aquí entrarían la mayoría de las salas, edificios y recipientes de procesos norteamericanos.

CME: concentración mínima explosiva, la menor concentración de polvo posible que puede soportar una explosión que se propaga a sí misma. Los términos LIE (límite inferior de explosividad) o LII (límite inferior de inflamabilidad) significan lo mismo, pero se usan poco en el contexto de explosiones de polvo.

Colector con soporte: dispositivo (cerramiento) que separa el material seco y sólido del aire, para lo cual pasa el aire a través de un medio de filtrado seco. Algunos ejemplos son los cerramientos con filtros de mangas, filtros de tipo cartucho (normalmente, un filtro de pliegues con forma cilíndrica, similar a los filtros de aire de los automóviles), filtros de tambor giratorio y filtros de panel. Consulte las fichas técnicas 1-45 (*Air Conditioning and Ventilating Systems*) y 7-73 (*Dust Collectors and Collection Systems*) para obtener información sobre los tipos de filtro.

Colector de polvo sin cerramiento: dispositivo diseñado y utilizado para eliminar el polvo del aire de transporte cuando el medio filtrante no está ni cerrado ni incluido en un contenedor.

Conexión equipotencial: conexión eléctrica entre dos objetos conductores de electricidad que minimiza la diferencia de potencial eléctrico entre ellos.

Construcción con limitación de daños (CLD): construcción diseñada para minimizar los daños causados por una deflagración (explosión) en equipos o edificios. Puede ser por resistencia a la presión, por descarga de la presión o por una combinación de ambas. Lo más habitual es que sean paneles de venteo en cerramientos (edificios o equipos) que se disparan a una presión por debajo de la resistencia del cerramiento.

EMI (energía mínima de ignición): cantidad mínima de energía térmica liberada en un punto de una mezcla combustible para provocar una propagación de llama indefinida en determinadas condiciones de prueba. El valor más bajo de EMI, conocido como EMIL, se halla en una determinada mezcla óptima, y es el valor que se suele notificar como EMI.

Flegmatización: proceso de mezcla de polvo inerte con polvo combustible para reducir o eliminar el riesgo de explosión.

Fuente de ignición potente: una ignición potente puede alcanzar más de 100 julios de energía aproximadamente.

- a) Entre los ejemplos de fuente de ignición potente se encuentran las llamas abiertas, los arcos de soldadura, las explosiones de gas o polvo y los arcos eléctricos/cortocircuito.
- b) Por el contrario, entre los ejemplos que no se considerarían una fuente de ignición potente están las chispas por fricción, las chispas por impacto mecánico, las chispas por electricidad estática, los cigarrillos, las superficies calientes y los componentes eléctricos sobrecalentados.

Homologado por FM: cuando en esta ficha técnica se utiliza el término «homologado por FM», significa que el producto o servicio cumple los requisitos de homologación de FM Approvals. Para obtener un listado completo de productos y servicios homologados por FM, consulte la Guía de productos homologados por FM.

K_{st} : constante de explosividad del polvo, definida como la tasa máxima de aumento de la presión de una explosión de polvo en un recipiente de 1 metro cúbico. Las unidades son bar metros por segundo (bar.m/s). El método de prueba empleado para obtener esta constante está normalizado en todo el mundo. Este valor (K_{st}) se utiliza en todas las medidas actuales de venteo de explosión de polvo para caracterizar la reactividad (es decir, la explosividad) de un polvo en concreto. En esta constante solo se usan unidades métricas.

Límite de resistencia: presión a la que un cerramiento se deformará sin romperse.

Líquido que arde: cualquier líquido o mezcla de líquidos capaz de alimentar un incendio, incluidos líquidos inflamables, líquidos combustibles o cualquier otra referencia a un líquido con capacidad de arder. Un líquido que arde debe tener un punto de combustión.

Mitigación de explosiones: métodos utilizados para reducir los daños provocados por la explosión después de que esta haya comenzado.

$P_{blast, max}$: presión local que resulta de la llamarada y la presión de una explosión venteada.

Placa de tubos: placa de montaje de los filtros de tipo cartucho o de las cajas o tubos de filtro de mangas.

P_{max} : presión máxima desarrollada en la esfera de 20 litros al comprobar las características de explosividad de un polvo con el método de ASTM E1226. Es el factor que se utiliza para ayudar a dimensionar los venteos de explosión.

Polvo, combustible: cualquier material orgánico (agrícola, plástico, químico, carbónico, etc.), partículas metálicas no oxidadas y demás material oxidable (p. ej., el estearato de zinc) se debe considerar como combustible. Las pruebas realizadas con la aplicación de una chispa, la llama de una cerilla o de un mechero Bunsen o Meker a pequeñas capas o pilas de material pueden ayudar a identificar dichos materiales, si bien existe la posibilidad de obtener falsos negativos.

Polvo, explosivo: establecido por la norma ASTM E1226, Standard Test Method for the Explosibility of Dust Clouds o su equivalente internacional (por ejemplo, UNE-EN 14034, Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. - Parte 1: Determinación de la presión máxima de explosión p_{max} de nubes de polvo, y UNE-EN 14034, Determinación de las características de explosión de nubes de polvo - Parte 2: Determinación de la velocidad máxima de aumento de presión de explosión $(dp/dt)_{max}$ de nubes de polvo). Un polvo que no se inflame ni arda en las pruebas de capas o acumulación podría considerarse como explosivo en una prueba de tipo E1226.

Polvo: pequeñas partículas sólidas capaces de mantenerse en suspensión en el aire mediante vertido, soplado, molienda, etc. En esta ficha técnica, se refiere únicamente a polvo combustible.

P_{red} : presión de explosión más alta en un recipiente protegido con venteos de explosión. Las unidades habituales son bar manométrico y psig.

Prevención de explosiones: métodos utilizados para evitar que se produzca una explosión mediante el control del aire, el combustible, la fuente de ignición o una combinación de estos.

psia: libra por pulgada cuadrada, absoluta (unidad de presión).

psig: libra por pulgada cuadrada, manométrica (unidad de presión).

P_{stat} : presión de alivio del venteo de explosión. Las unidades habituales son bar manométrico y psig.

Puesta a tierra: conexión eléctrica entre un objeto conductor y la tierra que minimiza la diferencia de potencial eléctrico entre el objeto y la tierra.

Recipiente resistente: recipiente que puede soportar presiones de explosión superiores a 0,2 bar man. (3 psig) sin resultar dañado ni destruido. Aquí entraría la mayoría de los recipientes de proceso construidos o utilizados en Europa.

Resistencia de diseño: presión a la que un recipiente puede exponerse sin riesgo de sufrir daños (porque se ha aplicado un factor de seguridad al límite elástico).

Resistencia límite: presión en un cerramiento a la que se producirá una ruptura.

Separador de partículas y aire: término general que designa un dispositivo diseñado para separar el polvo del aire en el que se transportan. Lo más habitual es que se trate de un ciclón o un colector de polvo.

Válvula de descarga doble: disposición en serie de dos válvulas de compuerta o de mariposa. Solo una de ellas está abierta cada vez. Esta válvula se utiliza a menudo cuando el material descargado de un recipiente se trasvasa por gravedad a otro recipiente (es decir, no de forma neumática), como por ejemplo un colector de polvo que descarga en una tolva situada debajo de él, o una trituradora o amoladora de material que descarga sobre un sistema de transporte neumático.

ANEXO B: HISTORIAL DE REVISIÓN DEL DOCUMENTO

Abril de 2017. Revisión provisional. Se modificó la recomendación 2.7.2.3 sobre la protección de los elevadores de cangilones para facilitar su comprensión.

Enero de 2017. Revisión provisional. Se llevaron a cabo los siguientes cambios:

- A. Se añadió material nuevo sobre la fabricación aditiva (impresión 3D).
- B. Se ampliaron los criterios de diseño de venteos de explosión y se han añadido criterios de protección contra incendios relativos a los elevadores de cangilones.
- C. Se añadió material nuevo sobre los colectores de polvo sin cerramiento.
- D. Se amplió la información sobre el uso correcto de dispositivos de venteo sin llama (tubos de extinción, apagallamas).
- E. Se efectuaron cambios de redacción.

Octubre de 2014. Revisión provisional. Se modificó la definición de polvo explosivo (eliminando el límite de tamaño de partículas específico) para adaptarla a las prácticas del sector.

Enero de 2014. Se llevaron a cabo cambios mínimos de redacción. Abril de 2013. Se han llevado a cabo cambios mínimos de redacción.

Enero de 2012. Se revisó la terminología relacionada con los líquidos que arden para proporcionar mayor claridad y coherencia en lo que respecta a las recomendaciones de prevención de siniestros de FM Global en cuanto a los riesgos asociados a dichos líquidos.

Marzo de 2009. En esta revisión se efectuaron cambios mínimos de redacción.

Enero de 2009. Se corrigió la ecuación de la sección 2.4.2.2.1.

Mayo de 2008. Se cambió el formato del documento para que sea más claro y fácil de usar, especialmente las recomendaciones. Se añadieron directrices de construcción y ubicación adicionales sobre las ubicaciones recomendadas para aquellas actividades que entrañen riesgo de explosión de polvo combustible. Se hizo especial énfasis en las características de mitigación y eliminación de riesgos de explosión. Se añadió el estrangulamiento como método de aislamiento.

Se perfeccionaron los criterios de los ventiladores y sopladores situados en los flujos de aire-polvo fugitivo, donde pueden convertirse en una fuente de ignición en atmósferas donde la concentración de polvo puede superar la CME.

Se simplificaron los criterios de protección de los recipientes cuya resistencia se desconoce.

Se resolvieron incoherencias con otras fichas técnicas, especialmente con la ficha técnica 7-73, *Dust Collectors*.

Se simplificó la sección Fundamento de las recomendaciones.

Mayo de 2006. En esta revisión se efectuaron cambios de redacción mínimos.

Se ha añadido una sección nueva, 3.2.3.9.1, Masa del panel de venteo típica (inercia).

Mayo de 2005. Se añadieron recomendaciones para poner en marcha un programa de gestión de cambios.

Enero de 2005. Cambios de redacción mínimos.

Mayo de 2004. Cambios de redacción mínimos.

Enero de 2003. Cambios de redacción mínimos.

Enero de 2001. El documento se reorganizó para mantener un formato coherente.

Agosto de 1995. Revisiones importantes por las que se implementa tecnología de dimensionamiento del venteo basada en el valor de K_{st} y se prescinde del método anterior de superficie de venteo en favor del método de volumen protegido.

Esta ficha técnica contempla numerosas recomendaciones nuevas que no figuraban en la edición de 1976. No obstante, muchas ubicaciones requerirán menos protección que la especificada en la versión anterior. Se realizaron las siguientes excepciones con respecto a los requisitos generales de protección contra explosiones:

- Los venteos de explosión no son necesarios en ciclones que manipulan polvo con un valor de K_{st} inferior a 80 (explosividad baja) y que tienen una salida de gas abierta en la parte superior cuyo diámetro es igual o superior al 45 % del diámetro del ciclón.
- Los sistemas que funcionan a una presión inferior a 0,1 bar abs. (1,5 psia) no requieren protección.
- Los secadores por atomización requieren una menor cantidad de venteo de explosión en comparación con otros equipos con el mismo volumen. Nota: Ahora, la superficie de venteo de explosión de los secadores por atomización y de otros equipos se calcula con el software DustCalc del Centro de investigación de FM Global.

ANEXO C: INFORMACIÓN DE INVESTIGACIÓN SOBRE LOS RIESGOS DE EXPLOSIÓN DE POLVO

Consulte el siguiente artículo:

Tamanini, F. y Valiulis, J.V. «Improved guidelines for the sizing of vents in dust explosions», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (Vol. 9. N.º 1. 1996), 105-118

ANEXO D: BIBLIOGRAFÍA

1. Bartknecht, W. *Dust Explosions: Course, Prevention, Protection*. Springer-Verlag, Nueva York, NY, 1989.
2. Alfert, F. y K. Fuhre. *Flame and Dust Free Venting of Dust Explosions by Means of a Quenching Pipe*. CMI-Report No. 89-25820-1. Chr. Michelsen Institute (Noruega), 1989.
3. Eckoff, R. K. *Dust Explosions in the Process Industries*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1991.
4. van Wingerden, K. «Prediction of pressure and flame effects in the direct surroundings of installations protected by dust explosion venting». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (Vol. 6, No. 4, 1993): 241–249.
5. WirknerBott, I., et. al. «Dust Explosion Venting: Investigation of the Secondary Explosion». Trabajo presentado en el Seventh International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Taormina, Italia, 1992.
6. Lunn, G. A. *Dust Explosion Prevention and Protection Part 3 — Venting of Weak Explosions and the Effect of Vent Ducts*. Rugby: Institute of Chemical Engineers, 1988.
7. Cooper, M. G., et. al. «On the Mechanisms of Pressure Generation in Vented Explosions». *Combustion and Flame* (1986) 65: 1-14.
8. Cubbage, P. A. y W. A. Simmonds. «An Investigation of Explosion Reliefs for Industrial Drying Ovens. I-Top Reliefs in Box Ovens». *Transactions of the Institute of Gas Engineers* (1955) 105: 470-526.
9. Siwek, R. y O. Skov. «Modellberechnung zur Dimensionierung von Explosionsklappen auf der Basis von praxisnahen Explosionsversuchen». *VDI Berichte* (1988) 701: 569-616.
10. Pineau, J. P. «Protection Against Fire and Explosion in Milk Powder Plants». *Europex First International Symposium*, Amberes, Bélgica, 16–19 de abril, 1984.
11. Hurlimann, H. «Results from Real Scale Explosion Tests». *Third International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, Basilea, Suiza, 1980.
12. van Wingerden, C. J. M. y H. J. Pasman. «Explosion Venting of Partially Filled Enclosures». *Conferencias sobre explosiones de polvo inflamable*, San Luis, Missouri, EE. UU., 2–4 de noviembre, 1988.
13. Zeeuwen, J. P. y G. G. M. van Laar. «Explosion Venting of Enclosures Partially Filled with Flammable Dust/Air Mixtures». *International Symposium on Control of Risks in Handling and Storage of Granular Foods*, París, Francia, 24-26 de abril, 1985.
14. Siwek, R. «New Knowledge About Rotary Air Locks in Preventing Dust Ignition Breakthrough». *Plant Operations Progress* (julio de 1989). Vol. 8, N.º 3: 165-176.
15. Green, D. W. y R. H. Perry. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, Eighth Edition (Chemical Engineers Handbook). Nueva York: McGraw-Hill, 2007.

16. DeGood, R. «Isolation: Another Way to Take the Bang out of Explosions». CPI Equipment Reporter (ene-feb 1988).
17. Siwek, R. «A Review of Explosion Isolating Techniques». Europex International Seminar, marzo de 1996.