



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Estudio comparativo del dimensionamiento de paneles de venteo de explosión de polvo combustible en equipos de proceso atendiendo a las normas EN 14491 y NFPA 68

Comparative study on the sizing of combustible dust vent panels in process equipment according to EN 14491 and NFPA 68 standards

Autor

Daniel Dean Casado

Director

Javier Lacambra Abós

Ponente

José Ángel Peña Llorente

Máster Universitario en Ingeniería Química

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Curso 2024/2025

AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primer lugar a José Ángel Peña, por su meticulosa revisión, supervisión y consejos durante la elaboración de este trabajo, así como por su disponibilidad desde el comienzo.

De igual manera quiero agradecer a Javier Lacambra por su dedicación y guía en este trabajo y todo lo que me ha enseñado en todo el tiempo de prácticas y TFM, y a Teresa Pérez por su apoyo y ayuda en todo este tiempo.

Estudio comparativo del dimensionamiento de paneles de venteo de explosión de polvo en equipos de proceso atendiendo a las normas EN 14491 y NFPA 68

RESUMEN

Las explosiones de polvo representan un riesgo significativo en industrias que manejan sólidos combustibles. Aunque menos intuitivas que las explosiones de líquidos o gases, estas explosiones han causado accidentes graves desde el siglo XVIII, motivando el desarrollo de normas y estrategias de prevención y protección.

El presente trabajo se centra en el dimensionamiento de paneles de venteo de explosión para equipos industriales críticos, como silos, filtros de mangas y elevadores de cangilones, atendiendo a la norma europea EN 14491:2012 y a la estadounidense NFPA 68 (2023).

Se comparan las áreas de venteo calculadas para diferentes geometrías de silos y filtros de mangas, considerando la influencia de parámetros clave como la relación altura-diámetro (L/D), la presión reducida máxima de explosión ($P_{red.m\acute{a}x}$) y las propiedades del polvo (K_{St} y $P_{m\acute{a}x}$). Los resultados muestran que, en general, la EN 14491 produce áreas de venteo mayores, reflejando un enfoque más conservador, mientras que la NFPA 68 permite ajustes más finos a las condiciones específicas del equipo.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	4
1.1	Antecedentes	4
1.2	Fundamentos teóricos	5
1.3	Conductos de venteo	9
1.4	Silos, filtros de mangas y elevadores de cangilones	9
2.	OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO	11
3.	NORMAS ESTUDIADAS	12
3.1	Norma EN 14491:2012.....	12
3.2	Norma NFPA 68.....	12
4.	METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	13
4.1	Modelo EN 14491:2012	13
4.2	Modelo NFPA 68	14
4.3	Condiciones de estudio.....	17
4.4	Casos de estudio	18
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	23
5.1	Silos y filtro de mangas	23
5.2	Influencia de la presencia de un conducto de venteo	24
5.3	Influencia de parámetros en silo cilíndrico.....	26
6.	CONCLUSIONES Y FUTUROS ESTUDIOS.....	29
7.	REFERENCIAS.....	31
	ANEXOS	1
	ANEXO A: DEFINICIONES	1
	ANEXO B: ESTIMACIÓN DE $P_{red.máx}$	3
	ANEXO C: ORIGEN DE LAS NORMAS.....	5
	ANEXO D: CÁLCULO DE L/D	6
	ANEXO E: CONDUCTOS DE VENDEO	12
	ANEXO F: EFECTO DE LA INERCIA DEL PANEL	14
	ANEXO G: EFECTO DEL VOLUMEN PARCIAL.....	15
	ANEXO H: CÁLCULO DE LAS CONSECUENCIAS DE LA EXPLOSIÓN	16
	ANEXO I: DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS DE VENDEO.....	20
	ANEXO J: HOJAS DE CÁLCULO	25

1. INTRODUCCIÓN

Las explosiones de polvo suponen una amenaza para la seguridad en las industrias donde se manejan sólidos combustibles, afectando a sectores tan variados como la industria agroalimentaria, farmacéutica, metalúrgica, maderera o la química, entre otras [1].

Aunque el riesgo de explosión en el manejo de estos sólidos pueda ser menos intuitivo en comparación con los líquidos y gases inflamables, se trata de una problemática que desde hace más de un siglo [2] se ha reconocido y combatido, muchas veces aprendiendo de la experiencia de accidentes que han ocurrido y, desgraciadamente, siguen ocurriendo.

1.1 Antecedentes

La primera explosión de polvo de la que se tiene registro ocurrió en 1785 en el almacén de harina de una panadería en Turín. Según el conocimiento de la época, se consideró inicialmente que la explosión había sido causada por la liberación de vapores emanados de la harina. Sin embargo, el análisis posterior evidenció que el producto presentaba un contenido de humedad excepcionalmente bajo, atribuible a un prolongado periodo de sequía de aproximadamente cinco o seis meses, lo que descartó dicha hipótesis inicial [3].

La industria minera del carbón también sufrió —y continúa sufriendo— numerosos accidentes, y aunque se pensara que el grisú era el único responsable, es muy probable que el polvo del carbón influyera fatalmente [3]. Faraday y Lyell (1845) fueron los primeros científicos en reconocer la importancia central del polvo en este tipo de explosiones y demostrar que el polvo podía inflamarse y dar lugar a una explosión por sí mismo, sin necesidad de un gas combustible soporte [3].

Otro gran accidente sucedió en 1878 en Minneapolis, Minnessota (EE.UU.). Un molino para la producción de harina, en aquel entonces el más grande del mundo, explotó, provocando que varios molinos adyacentes también explotasen. Hubo 18 fallecidos y múltiples heridos [4].

Durante el siglo XX, con el aumento de la industrialización a nivel mundial, surgieron nuevos procesos industriales y se fueron empleando nuevos sólidos combustibles. Las explosiones de polvo continuaron ocurriendo en todo el mundo, pero este periodo marcó el inicio de una comprensión más profunda del fenómeno y de los primeros esfuerzos sistemáticos por desarrollar normas y estrategias para combatir estos accidentes en la industria.

En los años transcurridos del siglo XXI la problemática continúa, aunque ahora se dispone de un conocimiento mucho mayor y de un gran abanico de herramientas para poder prevenir y mitigar las consecuencias de estas explosiones. La Tabla 1 recoge algunos accidentes relevantes del siglo XXI debidos a explosiones de polvo:

Tabla 1. Algunos accidentes por explosiones de polvo ocurridos en el siglo XXI

Accidente	Año	Sólido combustible	Consecuencias
West Pharmaceutical Services, Inc., North Carolina, EE. UU. [5]	2003	Caucho	6 fallecidos, 38 heridos
Imperial Sugar, Georgia, EE. UU. [6]	2008	Azúcar	14 fallecidos, 38 heridos
Kunshan, China [7]	2014	Aleación de aluminio	146 fallecidos, pérdidas directas de 351 millones de yuanes (unos 42 millones de euros)
Paraná, Brasil [8]	2023	Cereal	10 fallecidos, 10 heridos

Según el informe recogido por *Dust Safety Science*, de 2023 [8], en el que se obtiene una visión del estado actual de los accidentes debidos a explosiones de polvos combustibles en todo el mundo:

- En 2023, a nivel mundial se registraron 24 explosiones y 174 incendios, cifra que supone un incremento respecto a años anteriores
- Respecto a las sustancias implicadas, principalmente se registraron accidentes por sustancias relacionadas con el procesamiento de la madera y de la industria agroalimentaria (un 79% de los incendios y explosiones).
- En cuanto a los equipos en los que se produjo un mayor porcentaje de accidentes destacan los silos de almacenamiento, en los que se produjo un 36% de los accidentes totales. También, aunque en menor porcentaje, destacan los equipos de transporte y elevación, como los elevadores de cangilones, y equipos de captación de polvo, como filtros de mangas y ciclones.

En España se han registrado algunos accidentes (Tabla 2), que pueden ayudar a acercarse al problema a la realidad:

Tabla 2. Algunos accidentes por explosiones de polvo ocurridos en España

Accidente	Año	Sólido combustible	Consecuencias
Lérida [9]	1979	Grano de cereal	10 muertos
Harinas Porta, Huesca, España [10]	2005	Harina	5 fallecidos, 18 heridos, daños materiales

1.2 Fundamentos teóricos

Según el Departamento de Energía de los Estados Unidos [11], una explosión es “Una liberación repentina y rápida de energía que produce presiones potencialmente dañinas.” En función de la velocidad de propagación del frente de llama o velocidad de combustión se pueden clasificar en dos clases:

- **Deflagración:** la velocidad de propagación es inferior a la velocidad del sonido en aire.
- **Detonación:** la velocidad de propagación es superior a la velocidad del sonido en aire.

Para que se produzca una explosión de polvo es necesaria la confluencia de varios factores, que se suelen resumir en cinco, en lo que se conoce como el pentágono de la explosión (Figura 1). Este concepto va más allá del triángulo del fuego, en el que tradicionalmente se han incluido el combustible, comburente (normalmente oxígeno) y fuente de ignición como factores para que se inicie un fuego.



Figura 1. Pentágono de explosión de polvo

A continuación, se describe cada uno de los elementos del pentágono de la explosión:

1. **Polvo combustible:** en la Tabla 3 se resumen los principales grupos de sustancias que tienen el potencial de causar una explosión de polvo. Además de que por su composición química sea combustible, hay otros factores que afectan a la explosividad de un polvo:
 - a. La distribución del tamaño y forma de partícula, que determina su área superficial específica, factor clave a la hora de producirse la reacción de combustión. A menor tamaño de partícula, será más fácil que se produzca la explosión, y esta será más violenta, hasta cierto tamaño de partícula que depende del sólido combustible manejado [12].
 - b. El contenido de humedad y el grado de aglomeración de las partículas: a mayor grado de aglomeración disminuye el tamaño de partícula efectivo.

Tabla 3. Principales sustancias sólidas combustibles

Categoría	Ejemplos
Sustancias del sector agroalimentario	Harinas, almidones, azúcares, leche en polvo, cacao en polvo, cereales, especias, polvo de productos madereros.
Metales	Polvos de aluminio, hierro, magnesio, níquel, titanio, cinc y circonio.
Sustancias sintéticas	Resinas (melamínicas, epoxi, fenólicas), polímeros (polietileno, poliacrilamida, poliacrilonitrilo).
Carbón y otros materiales carbonosos	Carbón, bituminosos, coque.

2. **Dispersión:** es necesario que el sólido se encuentre dispersado en el aire formando una nube de polvo. Es clave la distribución de la concentración del polvo en la nube, que debe hallarse dentro de los límites de explosividad de la sustancia. También es importante el grado de turbulencia de la nube.
3. **Comburente:** normalmente es el oxígeno del aire. Es relevante la composición de la fase gas en la que se encuentra dispersa la nube de polvo.
4. **Fuente de ignición:** cuando la nube de polvo dispersa en el aire, con una concentración dentro de los límites de explosividad encuentra una fuente de ignición puede generar una reacción de combustión en cadena [3].
5. **Confinamiento:** si la nube de polvo se encuentra en un equipo de proceso o en una sala cerrada, la presión la presión se incrementará rápidamente, dando lugar a una explosión por deflagración de polvo.

El tipo de explosiones a las que se hace referencia en el presente trabajo son **explosiones por deflagración**, es decir, en ellas la velocidad de propagación es menor que la del sonido en aire, y la explosión se propaga mediante transferencia de calor a la mezcla no reaccionada [13].

Frente a esta problemática, las primeras medidas tomadas son medidas de prevención, tratando de eliminar la presencia de uno de los cinco elementos anteriormente descritos, principalmente la eliminación de la atmósfera explosiva (nube de polvo combustible y comburente en la proporción adecuada) o de la fuente de ignición [14]. Sin embargo, en algunos procesos, no es posible garantizar la ausencia de uno de los cinco factores o no es suficiente, por lo que se tiene que recurrir a la **protección contra explosiones**.

Existen dos modos de protección contra explosiones [15]:

- **Pasivo:** basado en el control de las consecuencias de la explosión, situándola a un nivel de riesgo aceptable para las personas y las instalaciones, mediante el control del incremento de presión y direccionamiento de las llamas. Como técnica de prevención pasiva destaca el uso de recipientes resistentes a la explosión.
- **Activo:** se basa en la minimización de las consecuencias de la explosión, no permitiendo que se propague al sistema. Las técnicas activas de protección contra explosiones son el venteo de explosiones y la supresión de explosiones.

El venteo de explosiones constituye el principal sistema **pasivo** de protección frente a explosiones empleado en la industria. Esta técnica se basa en la liberación controlada de las sobrepresiones internas generadas como consecuencia de una explosión en el interior de un equipo, con el objetivo de evitar que dichas presiones superen el valor que comprometería la integridad estructural del mismo. Para ello, se instalan uno o varios paneles de venteo diseñados para abrirse cuando se alcanza una presión denominada sobrepresión estática (P_{stat} [barg]), permitiendo así aliviar el exceso de presión y liberar hacia una zona segura las ondas expansivas y llamas generadas. La Figura 2 ilustra cualitativamente la evolución de la presión con el tiempo de una explosión de polvo sin venteo y con venteo.

El parámetro más relevante para dimensionar los paneles de venteo es la superficie o área de venteo (A_v [m²]), que deberá ser suficiente para lograr que la presión reducida máxima de explosión (máxima presión alcanzada en el equipo tras el venteo, $P_{red.máx}$ [barg]) no supere el valor que puede resistir el equipo

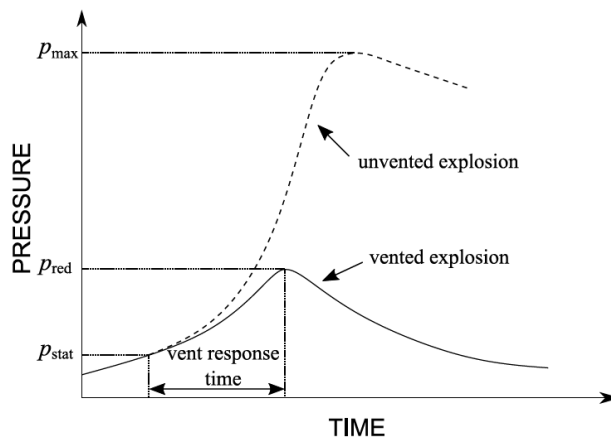


Figura 2. Evolución de la presión en una explosión con y sin venteo [16]

Los principales parámetros a tener en cuenta a la hora de dimensionar el área de venteo de explosión, incluyendo la presión estática de activación (P_{stat}) y la presión reducida máxima de explosión ($P_{red.máx}$), ya mencionadas, aparecen en la Tabla 4:

Tabla 4. Principales parámetros en el dimensionamiento del panel de venteo

Parámetro	Descripción	Unidades
$P_{red.máx}$	Presión reducida máxima de explosión: máxima sobrepresión generada por la explosión de una atmósfera explosiva de concentración óptima tras el venteo de la explosión. Ha de ser menor o igual a la máxima presión del recipiente [17]. Las normas dan pautas para obtener su valor (ver ANEXO B)	barg
P_{stat}	Presión estática de activación: presión diferencial a la que se activa el elemento de retención del panel permitiendo su apertura	barg
K_{St}	Índice de deflagración: valor máximo del aumento de presión por unidad de tiempo durante la explosión de una atmósfera explosiva que implique polvo en un recipiente cerrado [18]. Se obtiene mediante la ecuación 1 $K_{St} = \left(\frac{dP}{dt}\right)_{máx} \cdot V^{1/3} \quad (ec.1)$	bar.m. s ⁻¹
$P_{máx}$	Presión máxima de explosión: máxima presión que puede producirse en la deflagración	barg
$T_{inicial}, P_{inicial}$	Condiciones iniciales de temperatura y presión de la fase gas en la que está dispersa la nube de polvo	°C y barg respectivamente
PMR	Sobrepresión máxima del recipiente: máxima presión que el recipiente puede soportar de forma segura	barg
V	Volumen interior del recipiente	m ³
L/D	Relación entre la altura y el diámetro del equipo	Adimensional
M	Densidad superficial del panel de venteo: masa del panel por unidad de superficie	kg/m ²

Por otro lado, hay otros factores que son determinantes para que se produzca la explosión, descritos anteriormente en los elementos del pentágono de la explosión (Figura 1), aunque no aparezcan de forma explícita en el cálculo del área de venteo (en los estándares estudiados sí se hace referencia a factores como la concentración del polvo y la turbulencia).

Para más consideraciones acerca del diseño de los dispositivos de venteo ver ANEXO I.

1.3 Conductos de venteo

El uso de paneles de venteo correctamente dimensionados logra mantener la integridad estructural del equipo en el que se colocan, en el caso de una explosión en el interior de este. Sin embargo, hay peligros que no se evitan como la salida de dardos o bolas de fuego a través de la apertura del panel, así como la onda expansiva generada. Además, pese a ser un método relativamente barato y sencillo en comparación con otros métodos de protección de explosiones, no siempre es viable cuando el material pulverulento es tóxico o cuando el equipo está rodeado de obstáculos [14].

Cuando el equipo que se quiere proteger se encuentra en el interior de un edificio, será necesario evitar esta expulsión de llamas y de presión a su alrededor, lo que podría afectar a los trabajadores que se encuentren en las inmediaciones o a otros equipos, pudiendo generar otras explosiones o incendios. Una de las alternativas más empleadas es la conducción de la explosión (Figura 3): la instalación de un conducto que dirija la explosión hacia un lugar seguro en el exterior del edificio. La conducción de las explosiones requiere también un correcto dimensionamiento del conducto para evitar efectos indeseados, como la generación de explosiones secundarias [19].

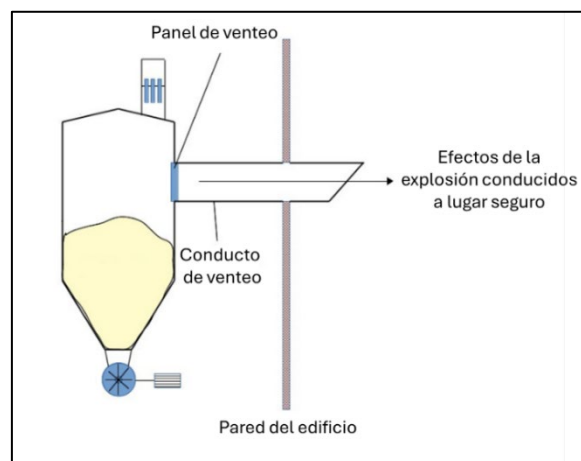


Figura 3. Panel de venteo con conducto. Adaptado de [20]

1.4 Silos, filtros de mangas y elevadores de cangilones

En las industrias de proceso donde se trabaja con polvos combustibles, hay equipos que son especialmente susceptibles de sufrir en su interior una explosión de polvo, y que se encuentran presentes en un gran número de plantas productivas. Entre ellos, destacan los silos, los filtros de mangas y los elevadores de cangilones.

Los **silos** en el tipo de industrias contempladas se emplean principalmente para el almacenamiento de sustancias pulverulentas o granulares. En su interior pueden formarse atmósferas explosivas durante las operaciones de llenado o vaciado. El panel o paneles de venteo se puede ubicar tanto en su parte superior como en los laterales (siempre por encima de la altura del material contenido en el silo [15]). En la Figura 4 se muestran algunos silos.



Figura 4. Diferentes silos de almacenamiento [21]

Respecto a los **filtros de mangas**, son los sistemas más comunes de separación de polvo y aire. La ubicación más común de los paneles de venteo es en el lateral del filtro (ver Figura 5), en el lado sucio (ANEXO D), y cerca de la tolva que descarga el polvo captado, evitando que las mangas obstruyan el flujo en la abertura de venteo [22].



Figura 5. Filtro de mangas con paneles de venteo en el lateral [22]

Los **elevadores de cangilones** suelen ser el medio preferido de transporte cuando se requieren elevaciones verticales largas para polvos o productos granulados [23]. Pueden tener diferentes configuraciones, en la Figura 6 se observa un elevador en forma de Z. El área de venteo debe ser mayor o igual al área de la sección del elevador, y en función de la altura del elevador será necesaria la instalación de varios paneles de venteo distanciados entre sí una cierta longitud [15].

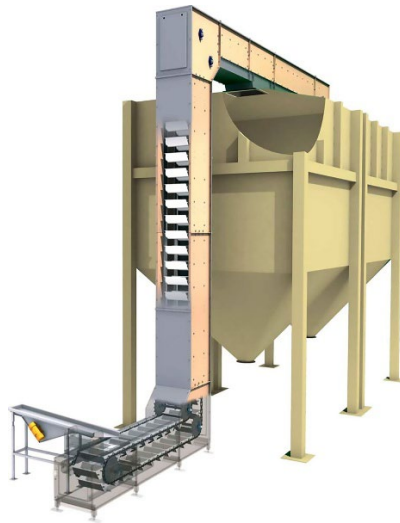


Figura 6. Ilustración de elevador de cangilones en Z [24].

2. OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO

El objetivo de este trabajo es dimensionar y comparar el área de paneles de venteo de explosión para equipos de proceso en plantas donde se manejan polvos combustibles (silos, filtros de mangas y elevadores de cangilones), de acuerdo con las normas empleadas actualmente para el cálculo de dichos sistemas de protección contra explosiones: la norma europea EN 14491 [25] y el estándar americano NFPA 68 [26].

También se analizará el efecto que tiene la instalación de un conducto de venteo en un silo cilíndrico desde la perspectiva de ambas normas.

El estudio incluye profundizar en la influencia de los principales parámetros empleados en el dimensionamiento del área de venteo de explosión ($P_{red.máx}$, K_{St} , $P_{máx}$, P_{stat} , L/D y el volumen del equipo, -ver Tabla 4-), analizando su influencia para ambas normas y las divergencias en los resultados obtenidos.

3. NORMAS ESTUDIADAS

En este contexto, las normas EN 14491, de la Unión Europea, y NFPA 68, de los Estados Unidos, constituyen una referencia para abordar el venteo de explosiones, aportando una guía y las ecuaciones necesarias para el dimensionamiento de paneles de venteo de explosión en diferentes condiciones. Las herramientas de cálculo y fórmulas aportadas por ambas normas están basadas en consideraciones teóricas y en modelos empíricos obtenidos mediante numerosos ensayos experimentales. Existen otros métodos y guías para el cálculo del área de venteo de explosión, listados de forma exhaustiva por Abbasi et al. [27] y Eckhoff [3].

En el ANEXO C se describe la evolución de las dos normas desde sus orígenes hasta la actualidad.

3.1 Norma EN 14491:2012

Es la referencia normativa de la Unión Europea [25], ratificada en España por AENOR en septiembre del 2012, con el siguiente título: *Sistemas de Protección por venteo de explosiones de polvo*.

Para la aplicación de esta norma, es indispensable considerar conjuntamente los siguientes estándares y normas:

- EN 13237:2025. *Atmósferas potencialmente explosivas. Términos y definiciones para equipos y sistemas de protección destinados a utilizarse en atmósferas potencialmente explosivas*. [28]
- EN 14460:2019. *Equipos resistentes a las explosiones*. [29]
- EN 14797:2007. *Dispositivos de venteo de explosión*. [30]
- EN 15089:2010. *Sistemas de aislamiento de explosión*. [31]

Junto a estas normas, las empresas de la Unión Europea que se enfrentan al riesgo de explosión de polvo en sus instalaciones por manejar sólidos combustibles se ven afectadas por las Directivas ATEX sobre atmósferas explosivas (Directiva 1999/92/CE [32] y Directiva 2014/34/UE [33]).

3.2 Norma NFPA 68

Es el estándar de la NFPA [26] ("*National Fire Protection Association*") [34], de los Estados Unidos. La edición actual, del año 2023, tiene el nombre "*Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting*" y es la que se va a emplear en este trabajo. Aporta un amplio abanico de recursos para el cálculo de paneles de venteo, tanto para líquidos y gases inflamables como para sólidos combustibles.

4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

4.1 Modelo EN 14491:2012

Respecto a las ecuaciones aportadas por este estándar europeo, en el apartado 5 del mismo se proporcionan las ecuaciones para el cálculo del área de venteo, considerando: “*un recipiente lleno de una nube de polvo turbulento con la concentración óptima de polvo*”.

Las ecuaciones deben aplicarse a recintos individuales donde se han tomado las medidas adecuadas de aislamiento de explosión para evitar la propagación de llamas entre recintos. En la Figura 7 se describe el procedimiento a seguir:

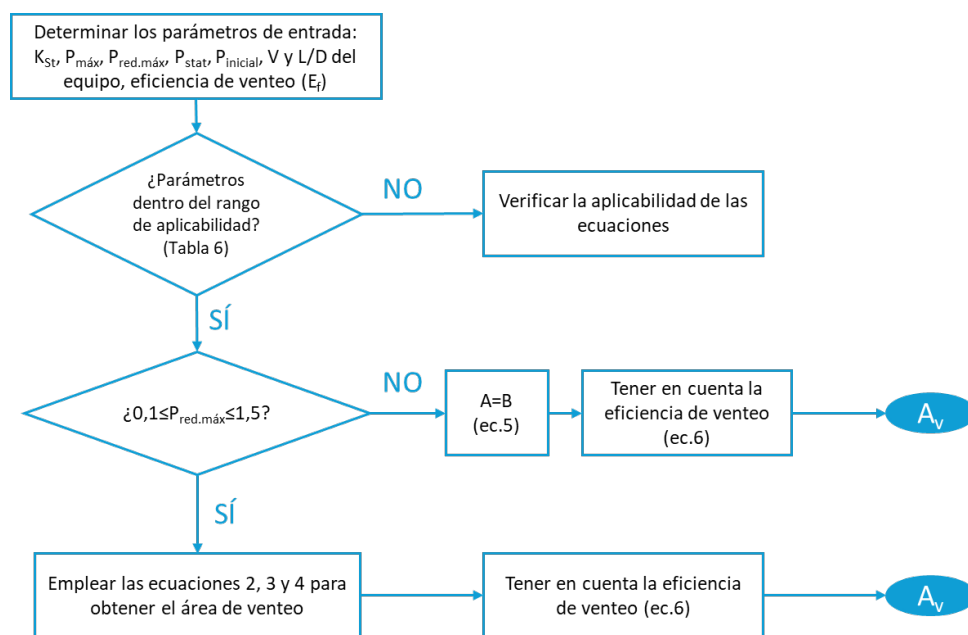


Figura 7. Procedimiento de cálculo del área de venteo para la norma EN 14491 [25]. Los números de tabla y de ecuación que aparecen en el procedimiento corresponden a la numeración del presente trabajo

$$A [m^2] = B \left(1 + C \times \log \frac{L}{D} \right) \quad (\text{ec.2})$$

donde

$$B = [3,264 \cdot 10^{-5} \times P_{máx} \times K_{st} \times P_{red.máx}^{-0,569} + 0,27 \times (P_{stat} - 0,1) \times P_{red.máx}^{-0,5}] \times V^{0,753} \quad (\text{ec.3})$$

$$C = (-4,305 \times \log P_{red.máx} + 0,758) \quad (\text{ec.4})$$

$$A [m^2] = B \quad (\text{ec.5})$$

$$A_v [m^2] = A/E_f \quad (\text{ec.6})$$

Por otro lado, la norma aporta la ecuación 7 para calcular la presión reducida máxima de explosión con conducto de venteo, $P'_{red.m\acute{a}x}$:

$$P'_{red.m\acute{a}x} [barg] = P_{red.m\acute{a}x} \times (1 + 17,3 \times (A \times V^{-0,753})^{1,6} \times l) \quad (\text{ec.7})$$

donde

A : \u00e1rea de venteo sin conducto de venteo [m^2];

V : volumen del equipo que se quiere proteger [m^3];

l : longitud del conducto de venteo [m].

Adem\u00e1s de estas ecuaciones aparecen sus condiciones de aplicaci\u00f3n (Tabla 5 y Tabla 6), una gu\u00eda para el c\u00e1lculo de la relaci\u00f3n L/D (ANEXO D), otras consideraciones respecto a los conductos de venteo (ANEXO E) y ecuaciones para el c\u00e1lculo de las consecuencias de la explosi\u00f3n (ANEXO H).

Tabla 5. Rango de validez de la ecuaci\u00f3n 7 para conductos de venteo

Propiedad	Rango de validez	Unidades
V	$0,1 \leq V \leq 10000$	m^3
Ratio l/d del conducto de venteo	$0,5 \leq l/d \leq 20$	Adimensional
l	$l \leq 10$	m
P_{stat}	$0,1 \leq P_{stat} \leq 0,2$	barg
$P'_{red.m\acute{a}x}$	$P'_{red.m\acute{a}x} \leq 2$	barg
$P_{red.m\acute{a}x}$	$0,1 < P_{red.m\acute{a}x} \leq 2$ $P_{red.m\acute{a}x}$ debe ser al menos $P_{stat} + 2$ veces el rango de tolerancia de P_{stat}	barg
$P_{m\acute{a}x}$	$5 \leq P_{m\acute{a}x} \leq 12$	barg

4.2 Modelo NFPA 68

En su cap\u00edtulo 8, “*Venting of Deflagrations of Dusts and Hybrid Mixtures*” [26], se proporcionan ecuaciones y procedimientos de c\u00e1lculo para tratar diferentes aplicaciones en el dimensionamiento de paneles de venteo. El c\u00e1lculo se realiza en varias fases; partiendo del c\u00e1lculo inicial, cada fase modifica el resultado anterior introduciendo correcciones en funci\u00f3n de las condiciones reales. Este proceso se detalla en la Figura 8:

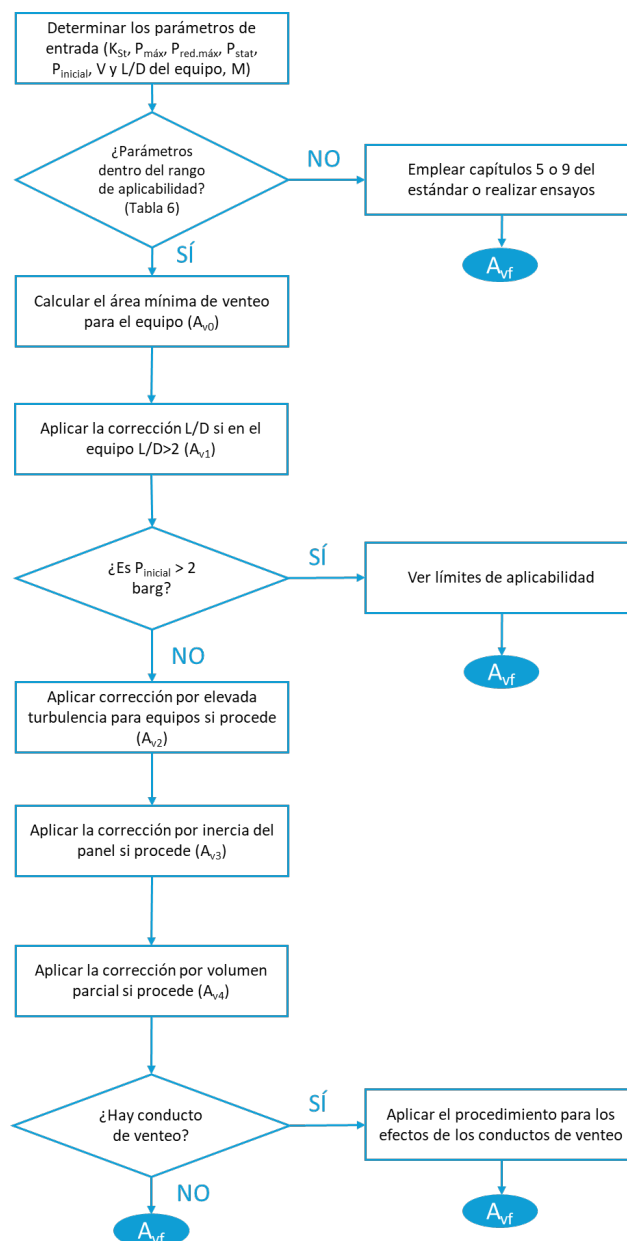


Figura 8. Procedimiento de cálculo de la norma NFPA 68 [26]

1. Cálculo del área de venteo inicial (A_{v0})

Cálculo del área de venteo requerida cuando la presión inicial en el interior del equipo es similar a la presión atmosférica (entre -0,2 barg y +0,2 barg) mediante la ecuación (ec.8):

$$A_{V0} = 1.10^{-4} \times (1 + 1,54 \times P_{inicial}^{\frac{4}{3}}) \times K_{St} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{máx}}{P_{red.máx}} - 1} \quad (\text{ec.8})$$

2. Efectos de L/D elevada (A_{v1})

Para el cálculo de L/D se considera la metodología empleada en el apartado 6.4. del estándar: “Enclosure Length-to-Diameter Ratio and Vent Variables” [26] (Ver ANEXO D).

- Para $L/D \leq 2$, A_{V1} es igual a A_{V0}
- Para $2 \leq L/D \leq 6$ (hasta 8 en silos, tolvas y depósitos), A_{V1} se calcula mediante la ecuación 9:

$$A_{V1} = A_{V0} \times \left[1 + 0,6 \times \left(\frac{L}{D} - 2 \right)^{0,75} \times \exp \left(-0,95 \times \left(\frac{P_{red.m\acute{a}x}}{1 + P_{inicial}} \right)^2 \right) \right] \quad (\text{ec.9})$$

Cuando la presión inicial es menor que 0,2 barg, $P_{inicial}$ toma el valor de 0 en la ecuación (ec.9).

3. Efectos adicionales de turbulencia (A_{V2})

En esta corrección se tiene en cuenta la velocidad axial (v_{axial}) y tangencial (v_{tan}) del aire en el equipo.

- Cuando los máximos valores de v_{axial} y v_{tan} son menores que 20 m/s, A_{V2} es igual a A_{V1}
- Cuando una de estas velocidades es mayor que 20 m/s, se debe aplicar la ecuación (ec.10):

$$A_{V2} = \left[1 + \frac{\text{m\acute{a}x}(v_{axial}, v_{tan}) - 20}{36} \times 0,7 \right] \times A_{V1} \quad (\text{ec.10})$$

4. Efectos de la inercia del panel de venteo (A_{V3})

Si no se aplica el efecto de la inercia del panel, A_{V3} es igual a A_{V2} . La corrección por inercia del panel se describe en el ANEXO F.

5. Corrección del volumen parcial del sólido combustible (A_{V4})

Si no se aplica el efecto del volumen parcial, A_{V4} es igual a A_{V3} . La corrección por volumen parcial se describe en el ANEXO G.

6. Efecto de venteo mediante conducto (A_{Vf})

El efecto del conducto de venteo se calcula mediante las ecuaciones (ec.11, 12, 13, 14 y 15). Si no existe conducto de venteo, A_{Vf} es igual a A_{V4} .

$$A_{Vf} = A_{V4} \times \left(1 + 1,18 \times E_1^{0,8} \times E_2^{0,4} \times \sqrt{\frac{K}{K_0}} \right) \quad (\text{ec.11})$$

donde

$$E_1 = \frac{A_{Vf} \times L_{conducto}}{V} \quad (\text{ec.12})$$

$$E_2 = \frac{A_{Vf} \times 10^4}{(1 + 1,54 \times P_{stat}^{4/3}) \times K_{St} \times V^{3/4}} \quad (\text{ec.13})$$

$$K = K_{entrada} + \frac{f_D \times L_{conducto}}{D_h} + K_{salida} + \dots \quad (\text{ec.14})$$

$$f_D = \left\{ \frac{1}{\left[1,14 - 2 \times \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{D_h} \right) \right]} \right\}^2 \quad (\text{ec.15})$$

K =coeficiente de resistencia total del conducto de venteo [adimensional]

$K_0=1,5$. Es el coeficiente de resistencia asumido para las configuraciones de los ensayos que generaron los datos para validar las ecuaciones para obtener A_{v0} y A_{v1} [adimensional]

$L_{conducto}$ =longitud total del conducto, incluyendo la longitud de codos y accesorios [m]

V = volumen del equipo que se quiere proteger [m^3]

f_D = factor de fricción de D'Arcy para flujo totalmente turbulento

D_h = diámetro hidráulico del conducto [m]

ε = rugosidad del conducto [mm]

4.3 Condiciones de estudio

Ambas normas tienen unos rangos de aplicabilidad, para los cuales los cálculos son válidos. Si uno de los valores se sale del rango marcado, habría que verificar la aplicabilidad de las ecuaciones empleadas en el estudio. En la Tabla 6 se muestran los rangos para cada uno de los principales parámetros de entrada de ambos estándares, así como el rango de estudio escogido.

Tabla 6. Rango de estudio de los diferentes parámetros estudiados

Variable	Rango (EN 14491)	Rango (NFPA 68)	Rango de estudio
Volumen [m^3]	0-10000	0-10000	0-10000
P_{stat} [barg]	0,1-1	< 0,75 (si $P_{inicial}$ < 0,2 barg)	0,1-0,75
$P_{red.m\acute{a}x}$ [barg]	0,1-2	0-0,75	0,1-0,75
K_{St} [$\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	300-800 (para $P_{m\acute{a}x}$ entre 5 y 12 bar) 10-300 (para $P_{m\acute{a}x}$ entre 5 y 10 bar)	10-800	10-300
$P_{m\acute{a}x}$ [barg]	5-12	5-12	5-10
L/D	1-20	0-8 (para silos, tolvas y depósitos) 0-6 en general	1-8 (para silos) 1-6 (para filtros de mangas)
Condiciones iniciales	$P_{abs} \leq 110\text{kPa}$ $\%O_2 \leq 21\%$ $-20^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C}$ Turbulencia	$-20\text{ kPa} < P_{rel} < 20\text{ kPa}$	Presión atmosférica, $\%O_2 = 21\%$ temperatura de 20°C

Los rangos de cálculo elegidos para cada una de las variables se han escogido de forma que sean aplicables para los dos estándares estudiados. Además, se han tenido en cuenta otros aspectos como los valores de la variable K_{St} para la mayoría de los sólidos combustibles, que no superan los $300\text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dentro de este rango de dicha variable, en la Tabla 7 se muestran las sustancias que se van a emplear para realizar los cálculos, con sus valores de K_{St} y $P_{m\acute{a}x}$, tomados de la NFPA

68. Cabe destacar que dichos valores están obtenidos para unos valores determinados de tamaño de partícula y de concentración de polvo [26].

Tabla 7. Sustancias estudiadas

Sustancia estudiada	K_{St} [bar.m.s⁻¹]	$P_{máx}$ [barg]
Azúcar	138	8,5
Maíz (polvo)	75	9,4
Carbón activo	14	7,7
Estearato de sodio	123	8,8
Cinc	176	7,3
Polipropileno	101	8,4

Por otro lado, la relación L/D se ha escogido en el rango válido para los silos cuando se estudien estos equipos, y en el rango genérico cuando se estudien los filtros de mangas. (Ver ANEXO D).

Las condiciones iniciales en la mayoría de los casos de este tipo de industrias se aproximan a las condiciones de aplicabilidad de las normas. Alejarse de ellas implica un aumento en la complejidad del cálculo que excede el alcance de los estándares empleados, pero hay investigaciones en torno al diseño de paneles de venteo cuando la presión inicial en el recipiente es elevada [35]. Aun así, en un contexto industrial real puede haber equipos que trabajen con una ligera sobrepresión o depresión. Esto no tendría implicaciones empleando la EN 14491, pero la NFPA 68 tiene un tratamiento más amplio de esta variable.

Para poder comparar los resultados obtenidos mediante ambas normas, las condiciones de partida han de ser las mismas, por lo que se realizan las siguientes suposiciones:

- Se considerará un *recipiente totalmente lleno de una nube de polvo turbulenta de concentración óptima de polvo* (EN 14491), por lo que no aplicará la corrección por volumen parcial de la NFPA 68.
- Se supondrá que el recipiente cuenta con dispositivos de aislamiento de explosión que evitarían la propagación de la explosión a otros equipos (EN 14491)
- Se considerarán velocidades axiales y tangenciales de entrada de aire en el equipo inferiores a 20 m/s, por lo que no se aplicará la corrección por efectos adicionales de turbulencia de la NFPA 68.
- Se considerará un panel de venteo con una densidad superficial menor que la densidad superficial umbral (M_T), por lo que no aplicará la corrección por inercia del panel de la NFPA 68.

4.4 Casos de estudio

Se va a realizar el cálculo del área de venteo de explosión según las dos normas contempladas para silos, para un filtro de mangas y para un elevador de cangilones (En el ANEXO J se encuentran las hojas de cálculo empleadas). La elección de estos equipos se justifica por haberse visto implicados en un mayor porcentaje de accidentes en la industria [8], además de que son

equipos que generalmente se encuentran en las industrias de proceso que manejan polvo combustible. También se analiza la influencia de algunos parámetros en el área de venteo para una geometría cilíndrica. En la Tabla 8 se resumen los casos estudiados y los parámetros de entrada comunes a dichos casos.

Tabla 8. Parámetros generales de entrada de los casos estudiados

Parámetros generales de entrada	Silo cilíndrico	Silo cilíndrico de base cónica	Filtro de mangas	Elevador de cangilones	Influencia de parámetros (silo cilíndrico)
$P_{m\acute{a}x}$ [barg]		8,5			Ver Tablas 14, 15 y 16
K_{St} [bar.m. s ⁻¹]		138			Ver Tablas 14, 15 y 16
$P_{red.m\acute{a}x}$ [barg]		0,3*			Ver Tablas 14, 15 y 16
P_{stat} [barg]			0,1**		
$P_{inicial}$ [barg]			0		
E_f [Adimensional]			1		

1. Silos

El dimensionamiento del área de venteo de explosión se realiza para dos silos con diferente geometría: un silo totalmente cilíndrico (Figura 9), y otro silo cilíndrico de la misma altura que posee en su fondo una base o tolva cónica truncada (Figura 10). Para ambos silos se contempla la existencia de un único panel de venteo que se ubicará en la tapa superior del silo. Para el silo cilíndrico se analiza la influencia de un conducto de venteo (Tabla 10). Los parámetros de entrada para realizar los cálculos del silo cilíndrico y del silo cilíndrico de base cónica se muestran en la Tabla 9 y Tabla 11, respectivamente.

a) Silo cilíndrico

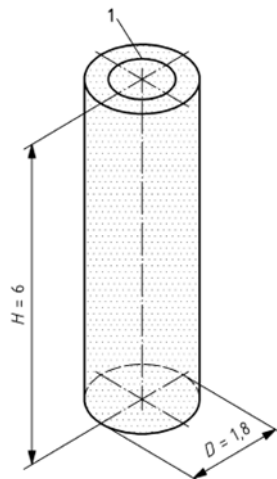


Figura 9. Silo cilíndrico estudiado. Tomado de [25].

* Este valor es un valor típico de sobrepresión máxima reducida de explosión [17].

** Suele ser un valor estándar de presión estática de activación [36], se tomará para todos los casos estudiados.

Tabla 9. Parámetros de entrada para el cálculo del área de venteo en silo cilíndrico

Parámetros de entrada	Silo cilíndrico
L_{total} [m]	6
D [m]	1,8
L/D EN 14491 [Adimensional] (ver ANEXO D)	3,3
L/D NFPA 68 [Adimensional] (ver ANEXO D)	3,3
V [m ³]	15,3

Por otro lado, se analiza la influencia de la posible existencia de un conducto de venteo recto de sección circular, del mismo diámetro que el panel de venteo que se calcule para el silo.

Tabla 10. Parámetros de entrada para el cálculo del área de venteo en silo cilíndrico con conducto de venteo

Parámetros de entrada	Conducto de venteo en silo cilíndrico
$L_{conducto}$ [m]	0-5 ^{***}
$E_{conducto}$ [mm]	0,05 [37]

b) Silo cilíndrico de base cónica

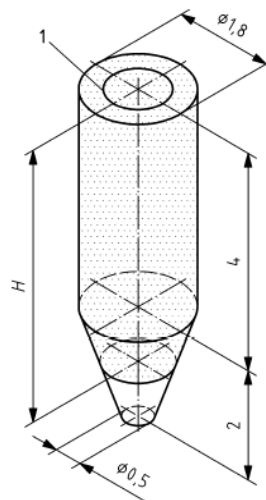


Figura 10. Silo cilíndrico de base cónica estudiado. Tomado de [25].

Tabla 11. Parámetros de entrada para el cálculo del área de venteo en silo cilíndrico de base cónica

Parámetros de entrada	Silo cilíndrico de base cónica
L_{total} [m]	6
Φ_1 [m]	1,8
Φ_2 [m]	0,5
$L_{base\ cónica}$ [m]	2
L/D EN 14491 [Adimensional] (ver ANEXO D)	3,3
L/D NFPA 68 [Adimensional] (ver ANEXO D)	3,3
V [m ³]	15,3

^{***} Las ecuaciones de la EN 14491 [25] solo son aplicables a conductos de venteo menores de 10 metros. Sin embargo, a partir de los 5 metros se dejan de cumplir otras condiciones de aplicabilidad (ver Tabla 6)

c) Filtro de mangas rectangular con tolva

Las mangas juegan un papel muy relevante en la evolución de la explosión, de forma que el dimensionado del área de venteo y la eficiencia del sistema depende de la ubicación del venteo con respecto a las mangas. La disposición escogida para el filtro de mangas estudiado es la situación ideal: las mangas están por encima del venteo, logrando un funcionamiento óptimo (ver ANEXO D). En la Figura 11 se ilustra la geometría del filtro de mangas estudiado, y en la Tabla 12 se muestran los parámetros de entrada para el cálculo del área de venteo.

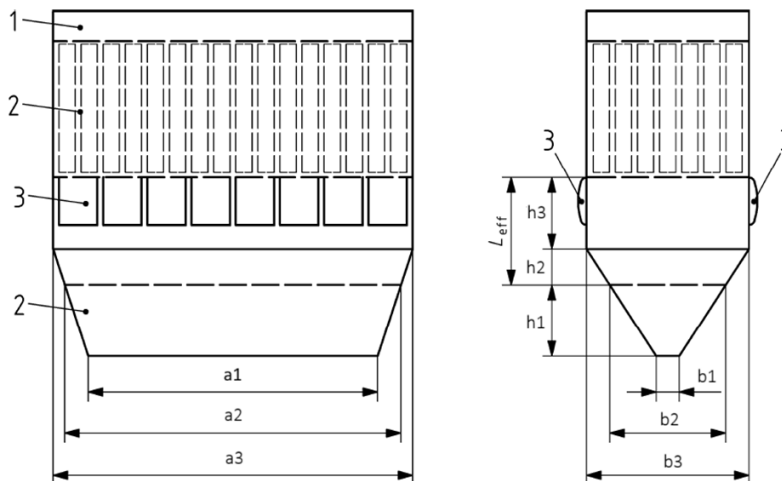


Figura 11. Filtro de mangas estudiado. Adaptado de [25].

Tabla 12. Parámetros de entrada para el cálculo del área de venteo en filtro de mangas

Parámetros de entrada	Filtro de mangas
h_1 [m]	1,2
h_2 [m]	0,6
h_3 [m]	4
a_1 [m]	0,5
a_2 [m]	5,8
a_3 [m]	6,2
b_1 [m]	0,4
b_2 [m]	2
b_3 [m]	2,8
V_{eff} (EN 14491) [m ³]	73,3
V_{eff} (NFPA 68) [m ³]	81,1
L/D EN 14491 [Adimensional] (ver ANEXO D)	1,0
L/D NFPA 68 [Adimensional] (ver ANEXO D)	1,6

d) Elevador de cangilones

Se tomará el caso de un elevador de cangilones de una sola caña, que puede considerarse como un recipiente alargado de sección rectangular. Se divide el elevador en secciones con $L/D < 10$ y cada sección se considerará un volumen a proteger, por lo que se calculará al área de venteo de cada sección [15]. En el caso estudiado, se ha dividido el elevador en dos secciones de igual altura y volumen (Figura 12).

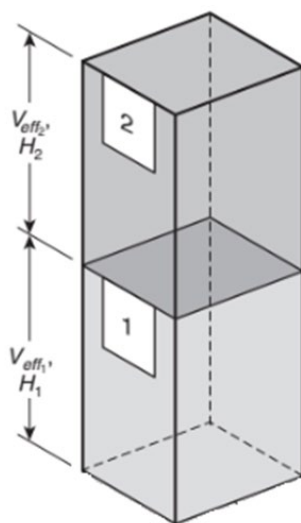


Figura 12. Esquema simplificado de la geometría del elevador de cangilones estudiado. Adaptado de [26].

En la Tabla 13 aparecen los parámetros de entrada para el cálculo en el elevador de cangilones.

Tabla 13. Parámetros de entrada para el cálculo del área de venteo en el elevador de cangilones.

Parámetros de entrada	Elevador de cangilones
L_{total} [m]	9
$H_1=H_2$ [m]	4,5
a [m]	0,5
b [m]	0,7
L/D EN 14491 [Adimensional] (ver ANEXO D)	6,7
L/D NFPA 68 [Adimensional] (ver ANEXO D)	7,6
$V_{eff1}=V_{eff2}$ [m ³]	1,6

e) Influencia de los parámetros más relevantes de diseño en el área de venteo, a partir de un silo cilíndrico

Se analizará la variación del área de venteo de explosión en función de la relación L/D (geometría del equipo), de $P_{red.máx}$ y de la sustancia empleada (variando K_{St} y $P_{máx}$). Los parámetros de entrada aparecen en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de entrada para el análisis de la influencia de la geometría del equipo

Parámetro	Influencia L/D	Influencia $P_{red.máx}$	Influencia sustancia empleada (K_{St} y $P_{máx}$)
Volumen [m ³]	100	100	100
L/D [Adimensional]	1-8	2, 4, 6, 8	1-8
K_{St} [bar.m. s ⁻¹]	138 (azúcar)	138 (azúcar)	Valores de las sustancias de la Tabla 6
$P_{máx}$ [barg]	8,5 (azúcar)	8,5 (azúcar)	Valores de las sustancias de la Tabla 6
$P_{red.máx}$ [barg]	0,2, 0,4, 0,5, 0,75	0,1-0,75	0,3

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación, se analizan los resultados de los cálculos realizados (en el ANEXO J se aporta la hoja de cálculo empleada en cada caso).

5.1 Silos y filtro de mangas

Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 15 y en la Figura 13.

Tabla 15. Áreas de venteo obtenidas para los equipos estudiados

Equipo	ÁREA DE VENTEO [m ²]	
	EN 14491	NFPA 68
Silo cilíndrico	1,5	1,0
Silo cilíndrico de base cónica	1,1	0,9
Filtro de mangas	2,0	2,1
Elevador de cangilones	0,8	0,6

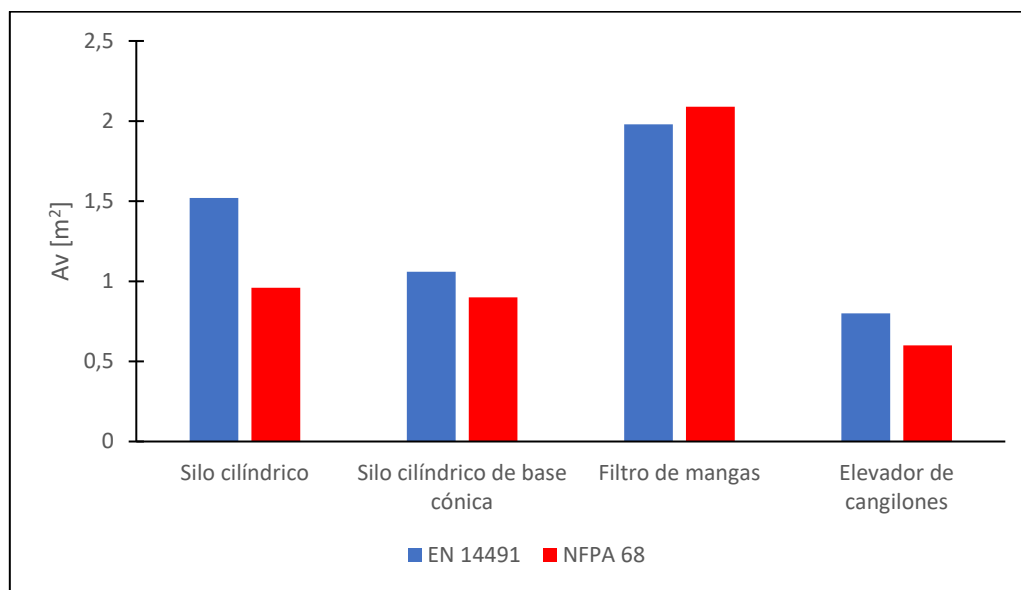


Figura 13. Resultados obtenidos para los tres equipos estudiados

Respecto a los silos, en ambos casos, el área obtenida mediante la norma EN 14491 es mayor. También se puede observar cómo para el silo cilíndrico de base cónica, esta diferencia en el área de venteo entre normas disminuye. Esto es debido a la disminución del volumen total, y a los diferentes criterios respecto al cálculo de la relación L/D de cada norma. Para este segundo silo, la EN 14491 considera que las llamas no se propagan de forma óptima para una geometría cónica, por lo que solo considera 1/3 de su volumen, lo que resulta en una relación L/D menor.

Debe recordarse que el área de venteo no debe exceder el área de la tapa superior del silo (como explica la norma NFPA 68). En la práctica, el área disponible para instalar dispositivos de venteo puede ser menor debido a limitaciones estructurales o técnicas [38].

Para el filtro de mangas el área mayor se obtiene a partir de la NFPA 68. Esto seguramente se debe a la consideración que hace la EN 14491 acerca de la propagación de las llamas en el equipo, tomando solo 1/3 del volumen de la tova para el cálculo del volumen efectivo. Esto se traduce en un volumen más pequeño que proteger según la norma europea, y en una relación L/D menor, lo que conduce al resultado obtenido.

En cuanto al elevador de cangilones, mediante la EN 14491 se obtiene un área mayor, pese a haberse obtenido una relación L/D menor. Las áreas obtenidas son menores que para el resto de los equipos, ya que el elevador estudiado tiene menor volumen que los demás equipos.

5.2 Influencia de la presencia de un conducto de venteo

Respecto a la influencia de la presencia de un conducto de venteo, a partir del área obtenida para el silo cilíndrico se ha estudiado la existencia de un conducto de venteo de longitud variable para observar qué efecto en el proceso de venteo. Las dos normas proporcionan diferentes herramientas para el cálculo de este efecto:

La norma EN 14491 permite calcular la evolución de la presión reducida máxima de explosión con dicha longitud. Una de las condiciones de aplicabilidad de las ecuaciones es que el área transversal del conducto debe ser la misma que el área del panel de venteo. Teniendo en cuenta las restricciones y aplicabilidad de las ecuaciones proporcionadas por las normas (ver ANEXO E), se obtiene lo siguiente (Figura 14):

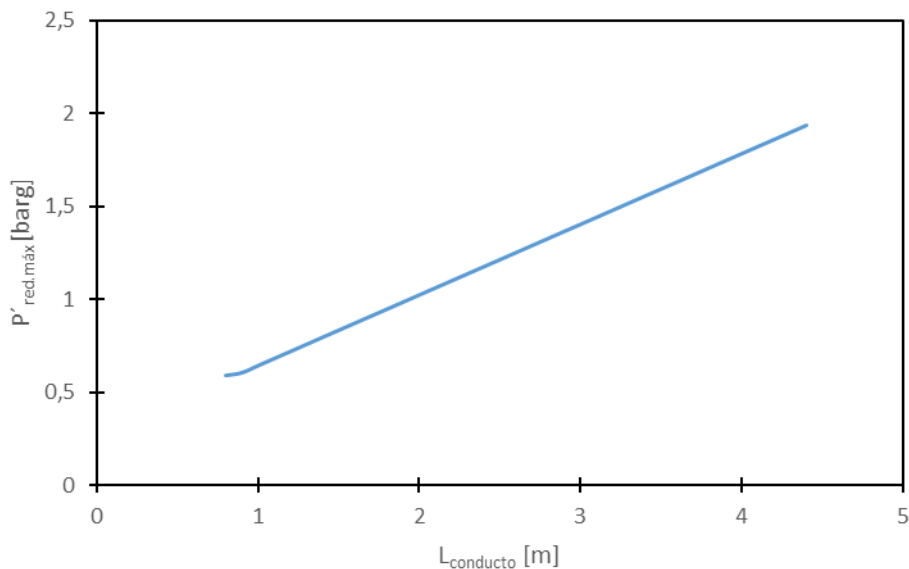


Figura 14. Variación de $P_{red.máx}$ con la longitud del conducto de venteo (EN 14491)

Solo se han tomado los resultados que entran dentro de los límites de aplicabilidad de la norma, esa es la razón por la que en la Figura 14 no aparece todo el rango de longitudes de conducto de venteo considerado.

Hay un incremento lineal de la presión reducida máxima de explosión generada. En caso de existir dicho conducto, este se podría llenar con una mezcla explosiva antes de que la llama saliera del equipo protegido. Se daría una explosión secundaria en el conducto, que retornaría y estorbaría el proceso de venteo, aumentando, de esta manera, la $P_{red.m\acute{a}x}$ dentro del equipo conforme aumenta la longitud del conducto de venteo [17]. Esto haría que se requiriese una mayor área de venteo.

La NFPA 68 sí permite obtener esta nueva área. Se ha calculado el área de venteo para el rango de longitudes de conducto estudiado (Figura 15)

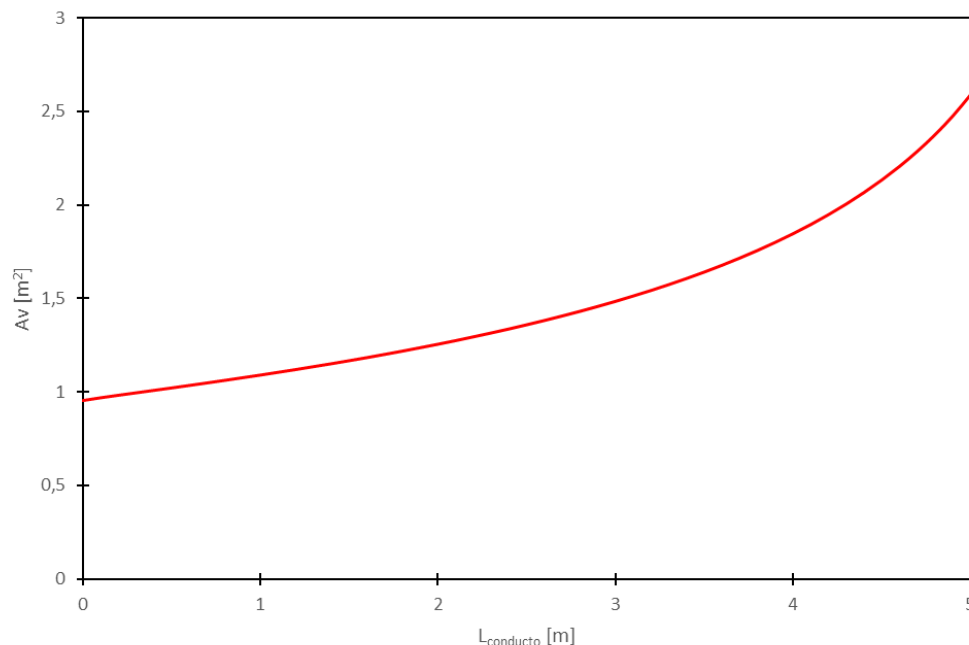


Figura 15. Variación del área de venteo con la longitud del conducto de venteo (NFPA 68)

Hay un incremento del área de venteo con la longitud del conducto. Este resultado conduce a la misma conclusión que para la EN 14491: si aumenta la longitud del conducto de venteo, aumenta el área de venteo requerida. Para longitudes de conducto hasta los dos metros, este aumento es aproximadamente lineal, y a partir de ese valor, y hasta los 5 metros, hay un incremento potencial del área de venteo. Para profundizar en este efecto del conducto de venteo en el área de venteo, hay en literatura estudios como el de Ural [39].

5.3 Influencia de parámetros en silo cilíndrico

En este apartado se analiza el efecto de la variación de algunos de los parámetros involucrados en la explosión, como la geometría del equipo (relación L/D), presión reducida máxima de explosión ($P_{red.m\acute{a}x}$) y la sustancia empleada (K_{St} , $P_{m\acute{a}x}$).

- Análisis de la influencia de la geometría del equipo (relación L/D):

En la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos para las dos normas estudiadas.

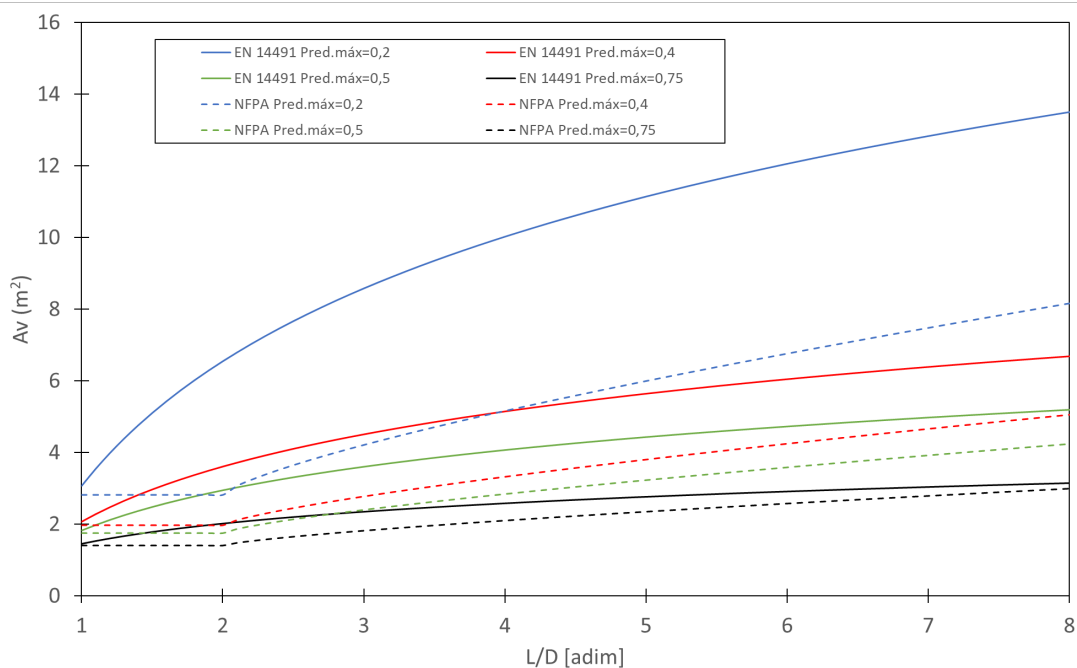


Figura 16. Influencia de L/D sobre el área de venteo A_v usando las dos normas estudiadas.

La evolución del área empleando la NFPA 68 presenta un tramo plano hasta llegar a $L/D=2$. Esto se corresponde con el criterio empleado para el cálculo según esta norma, que para relaciones L/D menores o iguales a 2 no considera la corrección por L/D elevada. A partir de $L/D=2$, las áreas calculadas según la NFPA 68 comienzan a incrementarse, siguiendo una tendencia muy similar a las áreas calculadas mediante la EN 14491, pero con áreas significativamente menores. La diferencia entre las áreas calculadas según las dos normas disminuye a mayor presión reducida máxima de explosión, y también, para $L/D=1$ las áreas obtenidas son muy similares, en especial para $P_{red.m\acute{a}x}$ elevadas.

- Análisis de la influencia de la presión reducida máxima de explosión ($P_{red.m\acute{a}x}$). Los resultados obtenidos se encuentran en la Figura 17.

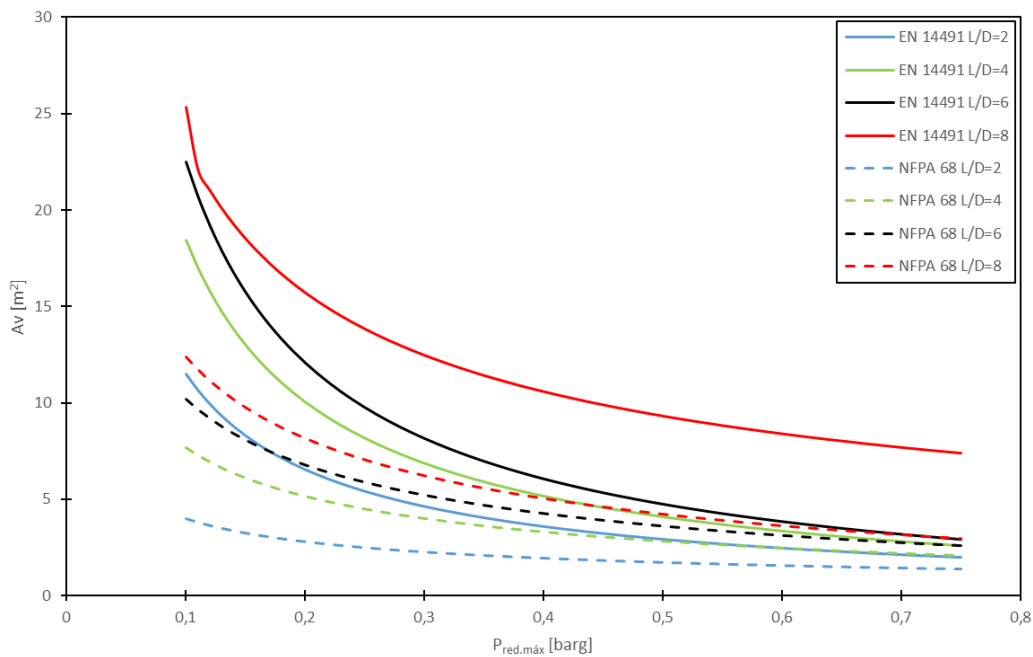


Figura 17. Influencia de $P_{red.m\acute{a}x}$ sobre el área de venteo (A_v) al varia L/D con las dos normas escogidas.

La presión reducida máxima de explosión influye de manera determinante en el área de venteo obtenida: $P_{red.m\acute{a}x}$ tiene como valor el límite presión de diseño del equipo, de forma que si aumenta la presión que el equipo puede resistir, es necesaria un área menor para evacuar el exceso de presión y no superar el valor de $P_{red.m\acute{a}x}$. Desde otro punto de vista, si se parte de un equipo menos resistente, se requerirá un área mayor para desalojar la explosión de manera efectiva.

La tendencia observada es clara; a mayor $P_{red.m\acute{a}x}$, menor área de venteo. En cuanto a las diferencias entre normas, en todos los casos estudiados se obtiene una mayor área de venteo con el modelo de la EN 14491, siendo menor la diferencia con la NFPA 68 cuanto menor es la relación L/D, especialmente para $P_{red.m\acute{a}x}$ más elevadas.

- Análisis de la influencia de la sustancia empleada (K_{St} , $P_{m\acute{a}x}$): los resultados se grafican en la Figura 18.

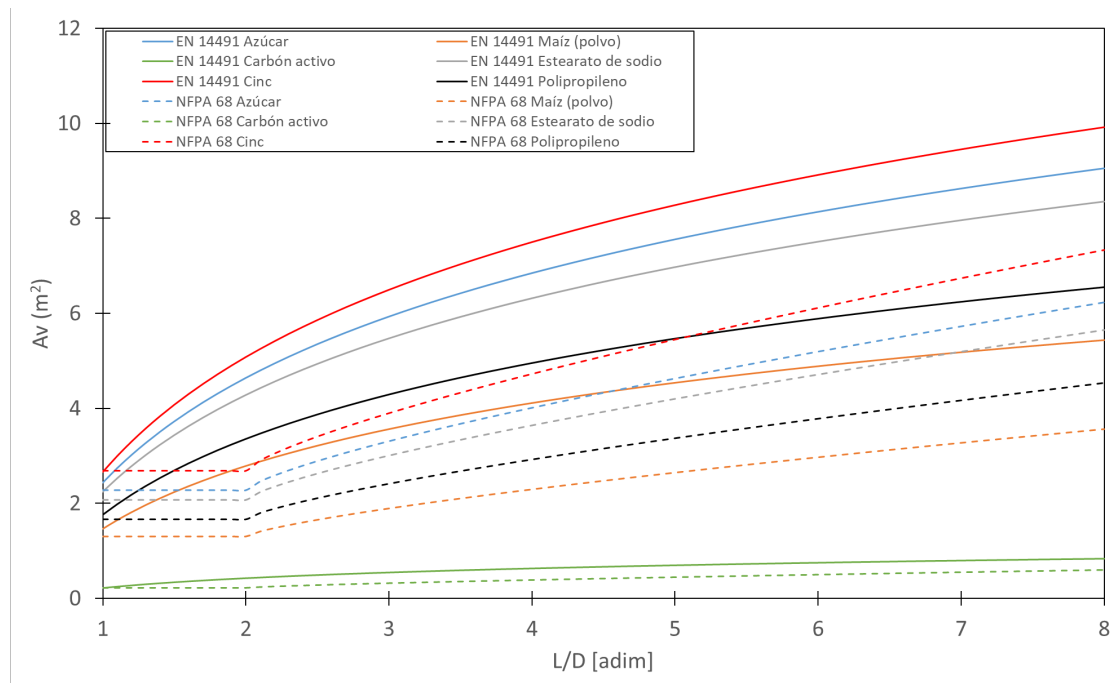


Figura 18. Influencia del ratio L/D respecto al área de venteo (A_v) para distintas sustancias empleadas caracterizadas por las constantes (K_{St} y $P_{m\acute{a}x}$).

Tal y como se observa, el área de venteo depende en gran medida de las características de la sustancia manejada (K_{St} y $P_{m\acute{a}x}$), principalmente del *índice de deflagración* (K_{St}). Las mayores áreas corresponden a las sustancias con mayor índice de deflagración, independientemente de la presión máxima. Por ejemplo, el mayor valor de $P_{m\acute{a}x}$ corresponde al maíz; sin embargo, este posee el segundo índice K_{St} más pequeño de las sustancias estudiadas, resultando en la segunda menor área de venteo. Las tendencias de evolución del área de venteo son similares para ambas normas, reduciéndose la diferencia en el área calculada entre ambas normas cuanto menor es el valor de K_{St} . En todos los casos, el área obtenida mediante la EN 14491 es mayor que la obtenida mediante la NFPA 68.

6. CONCLUSIONES Y FUTUROS ESTUDIOS

Las áreas de venteo de explosión calculadas de acuerdo con la EN 14491 resultan, de manera general, más elevadas (i.e., más conservadoras) que las obtenidas mediante la NFPA 68 para los casos estudiados. La única excepción es el filtro de mangas, para el que la NFPA 68 proporciona un área ligeramente mayor debido a los diferentes criterios en el cálculo de L/D y del volumen efectivo que maneja cada estándar. Estos resultados concuerdan con lo observado por *Tascón et al.* [38], que realizaron comparaciones para silos entre las dos normas, aunque en versiones anteriores (EN 14491:2006 y NFPA 68, 2007).

Una de las razones fundamentales de esta diferencia es la propia filosofía normativa. Por un lado, la NFPA 68 sigue un enfoque progresivo, que parte de un dimensionamiento inicial y permite ajustar el área de venteo a las condiciones reales del equipo mediante la aplicación sucesiva de factores de corrección. Por otro lado, la EN 14491 adopta un enfoque basado en modelos más rígidos y conservadores, con una menor capacidad de adaptación a condiciones específicas del proceso.

En este trabajo solo se han aplicado dos de las correcciones contempladas en NFPA 68 (L/D elevado y efecto de conducto de venteo), pero la norma americana dispone de hasta tres iteraciones adicionales que ajustan el área inicial de una forma más fina. La EN 14491, en cambio, utiliza ecuaciones más rígidas y menos adaptables, lo que con frecuencia conduce a un sobredimensionamiento del área de venteo, especialmente en equipos de gran volumen o con presiones máximas de diseño bajas. Esto puede suponer incrementos de coste relevantes en la implementación industrial del sistema de protección.

Ambos estándares presentan, además, una serie de limitaciones comunes. En particular, no consideran de forma explícita determinadas características de la sustancia, como el tamaño de partícula o el contenido de humedad, que influyen de manera significativa en la severidad de la explosión. Asimismo, ambos asumen la presencia de una nube de polvo homogénea a concentración óptima, una condición que rara vez se cumple en procesos industriales reales. No obstante, la NFPA 68 introduce una corrección por volumen parcial de nube, que permite reducir el área de venteo requerida cuando la atmósfera explosiva ocupa solo una fracción del volumen total del equipo.

En cuanto a alternativas para mejorar la precisión del dimensionamiento, en la literatura reciente se ha avanzado en modelos de dinámica computacional de fluidos (CFD) para simular más fielmente las fases de dispersión, ignición y combustión en nubes de polvo. *Skjold* [40] revisa el estado actual del modelado CFD aplicado a explosiones de polvo, y *Serrano et al.* [41] combinan experimentación en una esfera de 20 L con simulaciones CFD-DEM (*Discrete Element Method*) para estudiar la combustión de partículas en suspensión. Sin embargo, estas herramientas requieren modelos multifase complejos y altos recursos computacionales, lo que todavía limita su aplicación como método rutinario de diseño industrial.

Cabe destacar también que, pese a que la instalación de paneles de venteo se trata de una medida relativamente barata en comparación con otras medidas de protección contra explosiones, como la supresión contra explosiones, hay que tener en cuenta que la instalación de un panel de área de venteo mayor implica una mayor inversión en el equipo en cuestión. Esto se debe no solo al mayor coste del panel, sino también a que mayores áreas de venteo implican un diseño estructural más endeble, por lo que suele ser necesario reforzar la estructura (del silo, filtro de mangas, elevador de cangilones, etc.) con un mayor grosor de material o materiales con un módulo de Young (límite elástico) más alto, lo que conlleva un aumento del coste del equipo. Además, en el caso de los silos, colocar los paneles de venteo en el lateral, supone un coste añadido por disminución de capacidad, ya que para que el venteo sea efectivo, el nivel del polvo en el silo debe estar por debajo del panel de venteo.

A la vista de los resultados obtenidos, puede concluirse qué norma escoger en función del caso concreto de estudio. La EN 14491 resulta más adecuada en contextos donde se prioriza un enfoque conservador y alineado con el marco normativo europeo, especialmente en instalaciones sujetas a la Directiva ATEX y en situaciones donde se dispone de información limitada sobre el comportamiento real del polvo. Por su parte, la NFPA 68 ofrece una mayor flexibilidad y capacidad de ajuste a las condiciones específicas del equipo, lo que la hace particularmente útil cuando se cuenta con datos detallados del proceso y se persigue un dimensionamiento más optimizado. En cualquier caso, ambas normas proporcionan metodologías robustas y accesibles que sitúan el diseño del lado de la seguridad, constituyendo herramientas de referencia para la protección frente a explosiones de polvo en equipos de proceso.

7. REFERENCIAS

- [1] R. E. y. G. Li, «Industrial Dust Explosions. A Brief Rveview,» *Applied Sciences*, vol. 11, 2021.
- [2] P. Cardillo, «Some historical accidental explosions» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 14, pp. 69-76, 2001.
- [3] R. K. Eckhoff, *Dust explosions in the Process Industries*, 3ª ed. Elsevier, Ed. Gulf Proffesional Publisher, 2003.
- [4] S.Sutherland, «A century of dust» 2023, accedido: 30 septiembre 2025 (online). Disponible en: <https://www.nfpa.org/news-blogs-and-articles/nfpa-journal/2023/03/07/dust>.
- [5] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, «Dust explosion, West Pharmaceutical Services, inc.» 2004.
- [6] J. Vorderbrueggen, «Imperial sugar refinery combustible dust explosion investigation» *Process Safety Progress*, vol. 30, nº 1, pp. 66-81, 2011, doi: 10.1002/prs.10445.
- [7] G. Li, H.-X. Yang, C.-M. Yuan y. R. K. Eckhoff, «A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 39, pp. 121-130, 2016, doi: 10.1016/j.jlp.2015.11.013.
- [8] C. Cloney, «2023 Combustible Dust Incident Report» 2023, accedido: 1 de octubre de 2025 (online). Disponible en: <http://dustsafetyscience.com/2023-Report>.
- [9] M. Sanjuan, «Siete muertos y dos desaparecidos en el incendio de Lérida» *El País*, Lérida, 1979.
- [10] «Una explosión en la harinera Porta tras un rayo deja 11 heridos graves» *el Periódico de Aragón*, Huesca, 2005.
- [11] «U.S Department of Energy», accedido: 17 de octubre de 2025 (online). Disponible en: https://www.directives.doe.gov/terms_definitions/explosion. [Último acceso: 14 octubre 2025].
- [12] R. K. Eckhoff, «Does the dust explosion risk increase when moving from μm -particle powders to powders of nm-particles?» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 25, pp. 448-459, 2012, doi: 10.1016/j.jlp.2011.11.011.
- [13] J.H. S. Lee, F. Zhang y R. Knystautas, «Propagation mechanisms of combustion waves in dust-air mixtures» *Powder Technology*, vol. 71, nº 2, pp. 153-162, 1992, doi: 10.1016/0032-5910(92)80004-G.
- [14] M. Murphy, «So, you cannot vent: A deep dive into other explosion protection methods» *Process Safety Progress*, vol. 43, nº 4, pp. 744-749, 2024, doi: 10.1002/prs.12639.

- [15] X. D. Gea, *Prevención y protección de explosiones de polvo en instalaciones industriales*, FREMAP, 2007.
- [16] A. Islas, «CFD Modelling of dust explosions: Application to large-scale biomass silos», Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 2023.
- [17] J. G. Torrent, «Dispositivos y sistemas de venteo de explosión» de *Seguridad industrial en atmósferas explosivas*, Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, 2003.
- [18] M. D. R. R. y. S. C. A. Fumagalli, «Estimation of the deflagration index KSt for dust explosions: A review,» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 44, pp. 311-322, 2016.
- [19] L. D. Y. J. Y. Xingqing, «Secondary Explosions in Relief Duct During Aluminum Dust Explosion Venting,» *Procedia Engineering*, vol. 45, pp. 431-434, 2012.
- [20] Powder Process, «Dust Explosion Venting», accedido: 29 de noviembre de 2025 (online). Disponible en: https://powderprocess.net/Safety/Dust_Explosion_Venting.html.
- [21] Maquinaria Grupo Nueve, «Silos», accedido: 28 de noviembre de 2025 (online). Disponible en: <https://mgnfeedmills.com/es/productos/almacenamiento/silos>.
- [22] Fike Corporation, «Dust Collector Explosion Protection», accedido: 10 de noviembre de 2025 (online). Disponible en: <https://www.fike.com/explosion-protection/applications/dust-collectors/>.
- [23] G. A. L. y. A. T. P. Holbrow, «Explosion venting of bucket elevators» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 15, pp. 373-383, 2002.
- [24] Sinfimasa, «Elevadores de cangilones», accedido: 14 de diciembre de 2025 (online). Disponible en: <https://sinfimasa.com/productos/elevadores-cangilones/>.
- [25] *EN 14491:2012 Sistemas de Protección por venteo de explosiones de polvo*, 2012.
- [26] NFPA 68, *Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting*, 2023.
- [27] T. A. y. S. Abassi, «Dust explosions - cases, causes, consequences, and control» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 140, pp. 7-44, 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.11.007.
- [28] *EN 13237:2025. Atmósferas potencialmente explosivas. Términos y definiciones para equipos y sistemas de protección destinados a utilizarse en atmósferas potencialmente explosivas*.
- [29] *EN 14460:2019. Equipos resistentes a las explosiones*.
- [30] *EN 14797:2006. Dispositivos de venteo de explosión*.
- [31] *EN 15089. Sistemas de aislamiento de explosión*.

- [32] *Directiva 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 1999, relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas.*
- [33] *Directiva 2014/34/UE, 2014, sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas (refundición).*
- [34] NFPA, «NFPA», accedido: 2 de diciembre de 2025 (online). Disponible en: <https://www.nfpa.org/es>.
- [35] M. G. y. T. T. R. Siwek, «Dust explosion venting at elevated initial pressure» *Proceedings of the 7th International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, pp. 57.1-57.15, 1992.
- [36] REMBE GmbH Safety+Control, «REMBE Explosion Safety», accedido: 16 de noviembre de 2025 (online). Disponible en: <https://rembe.com/en/solutions/explosion-safety>.
- [37] F. M. White, «Capítulo 6. Flujo viscoso en conductos» de *Mecánica de fluidos, 5ª edición*, Mc Graw-Hill, 2025.
- [38] P. A. y. A. R. A. Tascón, «Dust explosion venting in silos: A comparison of standards NFPA 68 and EN 14491,» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 22, nº 2, pp. 204-209, 2009, doi: 10.1016/J.JLP.2008.12.006.
- [39] E. A. Ural, «A simplified method for Predicting the Effect of Ducts Connected to Explosion Vents» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 6, nº 1, pp. 3-10, 1993.
- [40] T. Skold, «Dust explosion modelling: Status and prospects» *Particulate Science and Technology*, vol. 36, pp. 489-500, 2018, doi: 10.1080/02726351.2017.1389790.
- [41] J. S. e. al., «Experimental and CFD-DEM study of the dispersion and combustion of wheat starch and carbon-black particles during the standard 20L sphere test» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 63, 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2019.103995.
- [42] *Directiva 94/9/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de marzo de 1994, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.*

ANEXOS

ANEXO A: DEFINICIONES

En este anexo se encuentran algunas definiciones obtenidas de las normas EN 14491 y NFPA 68 que pueden resultar útiles para la comprensión del presente trabajo.

A.1 EN 14491

Área de venteo requerida (A). Área de venteo requerida para el venteo de la explosión, suponiendo una eficiencia de venteo óptima.

Área geométrica de venteo (A_v). Relación entre el área de venteo requerida (A) y la eficacia de venteo (E_f) del dispositivo de venteo. El área geométrica de venteo es el área mínima de la sección transversal de paso de la abertura de venteo, teniendo en cuenta la posible reducción de la sección transversal, por ejemplo, debido a soportes de contrapresión, dispositivos de retención y partes del dispositivo de venteo de explosión que permanecen tras la rotura o el venteo.

Atmósfera explosiva. Mezcla con aire, en condiciones atmosféricas, de sustancias inflamables (combustibles) en forma de gases, vapores, nieblas o polvos, en la que, una vez producida la ignición, la combustión se propaga a toda la mezcla no quemada.

Constante de explosión de polvo (K_{st}). Valor máximo del aumento de la presión por unidad de tiempo $(dp/dt)_{m\acute{a}x}$ durante la explosión de una atmósfera explosiva específica que contiene polvo en un recipiente cerrado, bajo condiciones de ensayo especificadas, normalizado a un volumen de recipiente de 1 m^3 y multiplicado por $V^{1/3}$.

Recipiente. equipo que forma una parte distinta e identificable de una planta de proceso y al cual puede aplicarse la protección contra explosiones mediante venteo de explosión, tal como se describe en esta Norma Europea.

Sobrepresión estática de activación (P_{stat}). Presión diferencial a la que se activa el elemento de retención, de modo que el elemento de venteo puede abrirse.

Sobrepresión máxima de explosión reducida ($P_{red.m\acute{a}x}$). Sobrepresión máxima resultante generada por la explosión de una atmósfera explosiva en un recipiente, a concentración óptima de combustible, tras un venteo eficaz de la explosión o la supresión de la explosión.

Sobrepresión máxima de explosión ($P_{m\acute{a}x}$). Sobrepresión máxima que se produce en un recipiente cerrado durante la explosión de una atmósfera explosiva y que se determina bajo condiciones de ensayo especificadas.

A.2 NFPA 68

Polvo combustible. Sólido combustible particulado dividido finamente, incluyendo fibras y partículas ligeras, que presenta un peligro de incendio o explosión cuando está suspendido en el aire o el medio oxidante particular del proceso por encima de un rango de concentraciones

Deflagración. Propagación de una zona de combustión a una velocidad menor que la velocidad del sonido en el medio que aún no ha reaccionado.

Explosión. Estallido o rotura de un recipiente por el incremento de la presión en su interior procedente de una deflagración.

Concentración mínima explosiva (CME). Concentración mínima de polvo combustible que es capaz de propagar una deflagración a través de una mezcla uniforme de polvo y aire bajo unas condiciones de ensayo definidas.

Energía mínima de ignición (EMI). Cantidad mínima de energía liberada en un punto de una mezcla combustible que produce la propagación de la llama más allá de dicho punto, bajo unas condiciones de ensayo definidas.

ANEXO B: ESTIMACIÓN DE $P_{red.máx}$

B.1 EN 14491

La norma europea apenas proporciona información para estimar este parámetro. Solo se puede extraer de los límites de aplicabilidad que, para poder emplear la norma, ha de estar entre 0,1 y 2 barg, y que debe ser al menos $P_{stat} + 2$ veces el rango de tolerancia de P_{stat} .

B.2 NFPA 68

La NFPA 68 proporciona una guía para estimar el valor de $P_{red.máx}$ en su apartado 6.3 (en la norma estadounidense se le denomina P_{red} , pero alude al mismo parámetro que $P_{red.máx}$ en la norma europea).

$P_{red.máx}$ no debe exceder dos tercios de la resistencia máxima del equipo, si se asegura que se puede tolerar la deformación del equipo. Si no se puede tolerar la deformación del equipo, $P_{red.máx}$ no deberá superar dos tercios del límite elástico del equipo protegido.

Para equipos diseñados empleando el código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) “*Boiler and Vessel Pressure Code*”, o códigos similares, se determinará la presión de trabajo máxima admisible (P_{MAWP}) mediante cálculos.

Dada una P_{MAWP} , $P_{red.máx}$ se calcula mediante la ecuación B.1 o B.2:

- Si se puede aceptar una deformación permanente pero no la ruptura del equipo:

$$P_{red.máx} \leq \left(\frac{2}{3}\right) \times F_u \times P_{MAWP} \quad (\text{ec. B.1})$$

- Si no se puede aceptar la deformación permanente del equipo:

$$P_{red.máx} \leq \left(\frac{2}{3}\right) \times F_y \times P_{MAWP} \quad (\text{ec. B.2})$$

donde:

F_u : ratio de la resistencia máxima del equipo respecto al límite de resistencia admisible del equipo de acuerdo con el código ASME.

P_{MAWP} : presión de diseño del equipo (barg) de acuerdo con el código ASME.

F_y : ratio del límite elástico del equipo respecto al límite de resistencia admisible de los materiales de construcción del equipo.

El venteo debe ser suficiente para evitar que la máxima presión que se alcanza en el equipo ($P_{red.máx}$) supere la resistencia del equipo (P_{es}), incluyendo el efecto dinámico de la velocidad de

aumento de presión, expresada mediante el factor de carga dinámica (DLF), tal y como se expresa en la ecuación B.3:

$$P_{red.m\acute{a}x} \leq \frac{P_{es}}{DLF} \quad (\text{ec. B.3})$$

Donde:

P_{es} : Resistencia del equipo evaluada en base a cálculos de presión estática para deformación o explosión.

DLF se puede calcular mediante la ecuación B.4:

$$DLF = \frac{X_m}{X_s} \quad (\text{ec. B.4})$$

Donde:

X_m : máxima desviación dinámica

X_s : desviación estática (desplazamiento producido en el sistema cuando se aplica la máxima carga estáticamente)

En ausencia de un análisis estructural detallado, se permite asumir el valor de $DLF=1,5$ (peor escenario) y realizar el diseño en base al elemento estructural más débil del equipo.

ANEXO C: ORIGEN DE LAS NORMAS

C.1 EN 14491

En Europa, antes de que existieran normas europeas armonizadas, cada país tenía sus propios estándares técnicos sobre prevención y protección contra explosiones de polvo, siendo las guías alemanas de la asociación de ingenieros alemanes (*Verein Deutscher Ingenieure, VDI*) las que más influencia y reconocimiento obtuvieron. En los años 90 se buscó armonizar los criterios de seguridad en atmósferas explosivas, para lo que se creó el CEN/TC 305 (*European Committee for Standardization, Technical Committee*), que tomó como referencia las normas VDI y NFPA (*National Fire Protection Association*), de los Estados Unidos.

Con esta base, se inició la redacción de normas técnicas para polvos combustibles, y en paralelo, la legislación europea se consolidó con dos directivas fundamentales; la Directiva ATEX 94/9/CE [42] (actualmente la Directiva 2014/34/UE, *sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas*) y la Directiva ATEX 1999/92/CE, *relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas. Requisitos mínimos de seguridad para los trabajadores en lugares con riesgo de explosión*.

En 2006 aparece por la EN 14491:2006, anterior edición a la de 2012 y sobre la que se hicieron las modificaciones para llegar a la que es la actual EN 14491:2012.

C.2 NFPA 68

Este estándar norteamericano de la NFPA tiene su origen en un estándar preliminar publicado en 1945, el NFPA 68T, denominado *Explosion Venting Standard*. En 1954 se reemplaza por el NFPA 68, *Guide for Explosion Venting*, que ya incluía la mejor información disponible en el momento respecto a fundamentos y parámetros de explosión, experimentos a pequeña escala y la experiencia de los venteos empleados hasta entonces. Las recomendaciones del área de venteo estaban basadas en “reglas del dedo gordo” [26], las cuales se usaron durante muchos años.

Con esta guía como base, y gracias a la gran actividad experimental en el campo del venteo de explosiones a partir de la década de 1950, se fue revisando y actualizando la guía, incluyendo toda la información obtenida de los ensayos experimentales. A su vez, en las sucesivas ediciones (1994, 1998, 2002) se fue reorganizando la estructura, mejorando la redacción y actualizando los contenidos a las prácticas industriales vigentes.

En 2007 la guía da un salto cualitativo y pasa a ser un estándar, ya con el nombre que posee en la actualidad: *Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting*. Los requerimientos del estándar pasan a ser obligatorios en los Estados Unidos. Desde aquella edición, se han ido publicando actualizaciones en 2013 y 2018 hasta llegar a la edición actual.

ANEXO D: CÁLCULO DE L/D

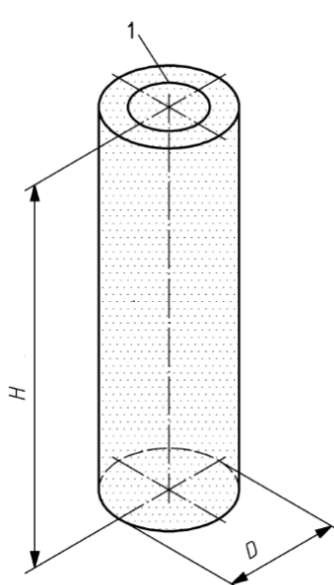
Para la realización de este cálculo, se toman como referencia el anexo C y el apartado 6.4 de la EN 14491 y NFPA 68, respectivamente.

D.1 EN 14491:2012

El anexo C de la norma europea nos proporciona una guía para calcular L/D para diferentes equipos alargados. De forma genérica los pasos a seguir son los siguientes:

- La clave está en determinar la distancia máxima que puede recorrer la llama antes de ser venteada (H), y el volumen efectivo de la parte del recipiente por el que pasa la llama cuando atraviesa la distancia máxima de la llama (V_{eff}).
- Dividiendo V_{eff} entre H se obtiene el área efectiva del recipiente (A_{eff}), con la que se obtiene un diámetro efectivo del recipiente (D_{eff}). Dividiendo H entre D_{eff} se obtiene la relación L/D

Para las dos geometrías contempladas para los silos:

GEOMETRÍA	ECUACIONES
<p>Silo cilíndrico con un solo panel de venteo en su parte superior</p>  <p>Figura 19. Silo cilíndrico</p>	<p>Este es el caso más sencillo. El cálculo es directo a partir de las dimensiones del silo:</p> $\frac{L}{D} = \frac{H}{D} \quad (\text{ec. D.1})$

Silo cilíndrico de base cónica con un solo panel de venteo en su parte superior

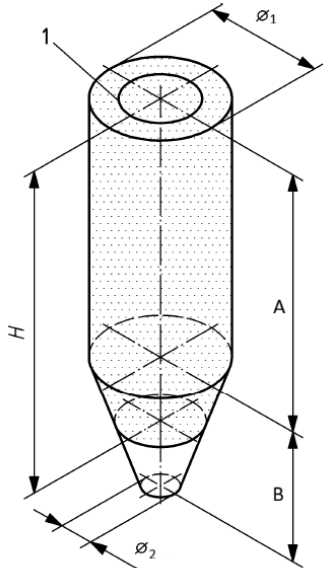


Figura 20. Silo cilíndrico de base cónica

Como las llamas no se propagan de manera óptima para una forma cónica, la longitud de llama en su interior se toma como 1/3 de la altura de la sección para calcular H. Por tanto, la distancia máxima de llama será:

$$H = \frac{B}{3} + A \quad (\text{ec. D.2})$$

De igual manera, solo 1/3 del volumen del cono se emplea para calcular el volumen efectivo V_{eff} (que se obtiene sumando el volumen del cilindro y el volumen del cono con la reducción explicada):

$$V_{eff} = \left(\frac{\pi \times \phi_1^2}{4} \times A \right) + \left[\frac{\pi \times B}{3} \times \frac{(\phi_1)^2 + (\phi_2)^2 + (\phi_1 \times \phi_2)}{12} \right] \quad (\text{ec. D.3})$$

$$A_{eff} = \frac{V_{eff}}{H} \quad (\text{ec. D.4})$$

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4 \times A_{eff}}{\pi}} \quad (\text{ec. D.5})$$

$$\frac{L}{D} = \frac{H}{D_{eff}} \quad (\text{ec. D.6})$$

El cálculo en **filtros de mangas** se torna más complejo, por la variedad de opciones que se encuentran en la industria respecto a la ubicación de los paneles de venteo en estos equipos y la disposición de las mangas de filtración. Los filtros de mangas son los equipos de separación de aire y polvo más empleados. Normalmente, tienen un volumen de aire "sucio", donde puede haber constantemente una nube de polvo combustible y un volumen de aire "limpio".

El volumen de aire limpio incluye el volumen interno de las mangas de filtración si el polvo se separa en la superficie exterior de las mismas. Considerando mangas de sección circular, si la distancia a entre los elementos de filtración es menor que el radio de los elementos (r), entonces todo el volumen que rodea a los elementos de filtración puede considerarse parte del volumen de aire limpio. En la siguiente figura aparece una vista de la sección de un filtro cuadrado en el lado de las mangas, con las mangas circulares, y que cumple la condición para excluir el volumen que rodea a las mangas del volumen de aire sucio.

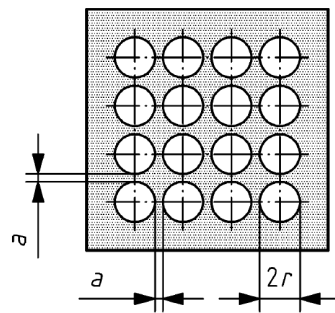


Figura 21. Sección de filtro de mangas cuadrado

Partiendo de esta consideración, que se aplicará en el filtro elegido para los cálculos, también es importante escoger correctamente la ubicación del panel o paneles de venteo. La ubicación preferida para ubicarlos es por debajo de las mangas de filtración, de modo que estas no se encuentren en la trayectoria de la liberación de las llamas y de la presión. Esta es la disposición elegida en el presente trabajo.

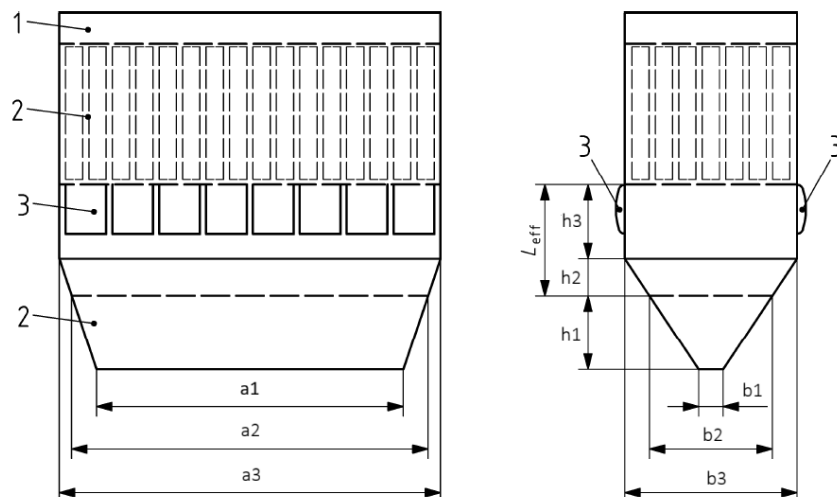


Figura 22. Filtro de mangas estudiado

El punto 1 corresponde al volumen de aire limpio por encima de las mangas de filtración. Los dos volúmenes señalados con el número 2 corresponden a lo que sería el volumen de aire sucio del filtro. Sin embargo:

- El volumen entre mangas, por la consideración anteriormente explicada, se toma como volumen de aire limpio
- El volumen por debajo de las mangas de filtración se puede dividir en la parte rectangular, donde se ubican los paneles de venteo (3), y la tolva rectangular, de la que solo se considerará 1/3 de su volumen para el cálculo de V_{eff} , debido a que la llama no se propaga de forma óptima en esta geometría.

La longitud efectiva de la llama será:

$$L_{eff} = h_2 + h_3 \quad (\text{ec. D.7})$$

El volumen efectivo se calculará en dos partes:

- Parte rectangular:

$$V_1 = a_3 \times b_3 \times h_3 \quad (\text{ec. D.8})$$

- 1/3 del volumen de la tolva rectangular:

$$V_2 = \frac{\frac{h_1 + h_2}{3} \times (a_1 \times b_1 + (a_1 \times b_1 \times a_3 \times b_3)^{0,5} + a_3 \times b_3)}{3} \quad (\text{ec. D.9})$$

$$V_{eff} = V_1 + V_2 \quad (\text{ec. D.10})$$

El área efectiva:

$$A_{eff} = \frac{V_{eff}}{L_{eff}} \quad (\text{ec. D.11})$$

Diámetro efectivo:

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4 \times A_{eff}}{\pi}} \quad (\text{ec. D.12})$$

Y ya se puede obtener la relación L/D:

$$\frac{L}{D} = \frac{L_{eff}}{D_{eff}} \quad (\text{ec. D.13})$$

Respecto a los **elevadores de cangilones**, para el cálculo de L/D, si consideramos un elevador de una sola caña, se divide el elevador en secciones, y se calcula la relación L/D de cada sección. Cada sección será un volumen para proteger y se calculará el área de venteo de cada sección.

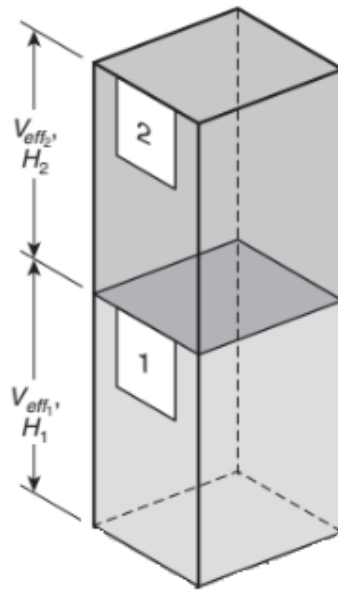


Figura 23. Esquema del elevador de cangilones estudiado

Para el volumen 1:

$$V_{eff1} = H_1 \times a \times b \quad (\text{ec. D.14})$$

$$A_{eff1} = \frac{V_{eff1}}{H_1} \quad (\text{ec. D.15})$$

$$D_{eff1} = \sqrt{\frac{4 \times A_{eff1}}{\pi}} \quad (\text{ec. D.16})$$

$$\frac{L}{D} = \frac{H_1}{D_{eff1}} \quad (\text{ec. D.17})$$

Para el volumen 2, si H_1 es igual a H_2 se realizan los mismos pasos.

D.2 NFPA 68

Para ambas normas se tomarán los esquemas de los equipos vistos para la EN 14491:2012.

Algunas consideraciones que proporciona antes de pasar a los cálculos aplican también para la EN 14491:2012:

- Para silos y otros recipientes que solo pueden ser venteados por un extremo, el área máxima efectiva de venteo debe ser el área transversal del recipiente

- Para recipientes que pueden disponer de venteos en más de un punto a lo largo del eje mayor, se permite que estén distribuidos a lo largo del eje mayor y dimensionados en base a la relación L/D entre venteos. En este caso el área máxima efectiva de venteo tampoco puede superar la sección transversal del recipiente

Para obtener el valor de H, A_{eff} se emplean las mismas ecuaciones que para la EN 14491:2012. Para el volumen efectivo la diferencia es que se considera todo el volumen de la tolva, en vez de solo 1/3 de este volumen, como considera la EN 14491. Por otro lado, no se habla de diámetro efectivo, sino de diámetro hidráulico efectivo (D_{he}), y se calcula en función de la forma general del recipiente:

Cuando el recipiente, y si existe, la tolva, son generalmente cilíndricos (aplica para los dos silos estudiados en el trabajo, descritos anteriormente)

$$D_{he} = \sqrt{\frac{4 \times A_{eff}}{\pi}} \quad (\text{ec. D.18})$$

Cuando el recipiente, y si existe, la tolva, son generalmente rectangulares, y la relación entre la longitud (de las dimensiones de la sección transversal, la de mayor tamaño) y la anchura es mayor o igual a 1,2, el diámetro hidráulico se obtiene de la siguiente manera:

$$D_{he} = \frac{4 \times A_{eff}}{p} = \sqrt{A_{eff}} \quad (\text{ec. D.19})$$

Esta última consideración para el diámetro hidráulico parte de asumir la sección transversal como cuadrada, tal y como explica la NFPA en el cálculo de L/D para una geometría como la del filtro de mangas estudiado.

Por último, L/D en este estándar se calcula como:

$$\frac{L}{D} = \frac{H}{D_{he}} \quad (\text{ec. D.20})$$

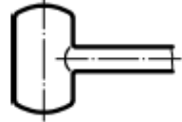
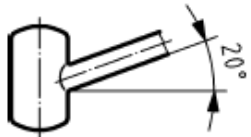

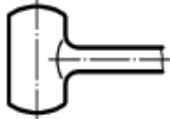
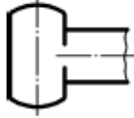
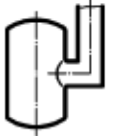

ANEXO E: CONDUCTOS DE VENTEO

E.1 EN 14491:2012

La EN 14491 aporta algunas condiciones acerca del diseño de los conductos:

- Los conductos deben tener al menos la misma resistencia a la explosión que el equipo protegido, y debe ser probada de acuerdo con la EN 14460.
- Si hay conducto de venteo, el panel de venteo debe estar ubicado directamente sobre el equipo y no al final del conducto.
- Hay algunas configuraciones a las que no se puede aplicar la ecuación para el incremento de $P_{red.máx}$ anteriormente descrita, y otras a las que sí se puede aplicar.

Tabla E.1. Configuraciones permitidas y no permitidas del conducto de venteo según la EN 14491

Configuración	Esquema	Aplicable
Conducto recto de la misma área que el panel de venteo		SÍ
Conducto recto con un ángulo máximo de 20° respecto al panel de venteo, de la misma área que este.		SÍ
Conducto con codo gradual (radio de curvatura/diámetro conducto > 2)		SÍ
Conducto de área menor que el área de venteo		NO
Conducto de área mayor que el área de venteo		NO
Codo de 90°		NO
Codo de 45°		NO

E.2 NFPA 68

Además de las ecuaciones para el cálculo de la nueva área de venteo si existe conducto, la norma norteamericana proporciona algunas guías y condiciones de aplicabilidad:

- La ecuación 11 no es aplicable si el panel de venteo no está ubicado al comienzo del conducto
- La ecuación 11 no es aplicable si la presión inicial supera los 0,2 barg
- La ecuación 11 no es aplicable si la sección transversal del conducto de venteo varía en más de un 20% a lo largo de su longitud
- Se permite emplear dicha ecuación para conductos equipados con codos, protección para pájaros o coberturas para la lluvia, siempre que estos elementos estén incluidos en el cálculo de la resistencia total del conducto
- La máxima longitud del conducto debe estar limitada para obedecer la siguiente inecuación (ecuación 15), y las ecuaciones 16 y 17:

$$L_{eff} \leq \min \left[\frac{10000 \times D}{K_{St}}, \frac{11000}{K_{St}} \right] \quad (\text{ec. E.1})$$

donde

$$L_{eff} = \min (L_{eff}, L_{dusty}) \quad (\text{ec. E.2})$$

$$L_{dusty} = (P_{m\acute{a}x} - P_{red.m\acute{a}x}) \times V / A_v \quad (\text{ec. E.3})$$

ANEXO F: EFECTO DE LA INERCIA DEL PANEL

En el procedimiento de cálculo del área de venteo para la NFPA 68, la corrección 4 muestra cómo puede influir la masa por unidad de superficie del panel empleado. En el trabajo se ha considerado no aplicar esta corrección. En caso de que aplicase, esta influencia se calcularía de la forma explicada a continuación.

Si la densidad superficial del panel es $\leq 40 \text{ kg/m}^3$, se ha de usar la ecuación 16 para determinar la masa umbral M_T (si es mayor a 40 kg/m^3 hay un procedimiento en el Anexo G de la norma).

$$M_T = \left[6,67 \times (P_{red.m\acute{a}x}^{0,2}) \times (n^{0,3}) \times \left(\frac{V}{K_{St}^{0,5}} \right) \right]^{1,67} \quad (\text{ec. F.1})$$

Donde n es el número de paneles de venteo.

- Para $M > M_T$, A_{V3} se calcula mediante la ecuación 17:

$$A_{V3} = F_{SH} \times \left[1 + (0,0075) \times M^{0,6} \times \left(\frac{K_{St}^{0,5}}{n^{0,3} \times V \times P_{red.m\acute{a}x}^{0,2}} \right) \right] \times A_{V2} \quad (\text{ec.F.2})$$

Para K_{St} menor a 75 se debe usar $K_{St}=75$ en la anterior ecuación

- Para $M < M_T$, A_{V3} es igual a A_{V2} .

ANEXO G: EFECTO DEL VOLUMEN PARCIAL

Para la norma NFPA 68 en el presente trabajo no se ha considerado la corrección por efecto del volumen parcial (corrección 5). El procedimiento de cálculo aportado por la norma en el caso de aplicar esta corrección se describe en este anexo.

La fracción de llenado del equipo se calcula mediante la ecuación G.1:

$$X_r = \frac{M_e / (V_{equipo} - V_{sólido})}{c_r} \quad (\text{ec. G.1})$$

donde:

M_e es la masa de polvo combustible que podría estar suspendida en el equipo;

V_{equipo} es el volumen del equipo en m^3 ;

$V_{sólido}$ es el volumen de los sólidos;

$$c_r = 0,5 \times c_w;$$

c_w concentración de polvo en el peor escenario (g/m^3).

El valor de c_w debe estar basado en los resultados experimentales de $(dP/dt)_{m\acute{a}x}$ en función de la concentración, empleando el estándar ASTM E1226, "Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds". Si no hay datos de c_w , se puede tomar un valor de $200 g/m^3$ para determinar c_r .

Cuando la fracción de llenado X_r se puede determinar para el peor escenario de explosión, el mínimo área de venteo requerido se calcula con la ecuación G.2:

$$A_{v4} = A_{v3} \times X_r^{-1/3} \times \sqrt{\frac{X_r - \Pi}{1 - \Pi}} \quad (\text{ec. G.2})$$

donde:

A_{v4} es el área de venteo para volumen parcial;

A_{v3} es el área de venteo para volumen completo;

X_r es la fracción de llenado ($>\Pi$);

$$\Pi = \frac{P_{red.m\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x}}$$

Si $X_r \leq \Pi$, no será necesario el venteo.

ANEXO H: CÁLCULO DE LAS CONSECUENCIAS DE LA EXPLOSIÓN

Ambas normas proporcionan ecuaciones para calcular cuáles son los efectos de la explosión en el exterior del equipo:

H.1 EN 14491

Efectos de llama: la longitud de llama en el exterior tras el venteo se puede estimar mediante la ecuación H.1:

$$L_F = 10 \times V^{1/3} \quad (\text{ec. H.1})$$

donde:

L_F es la longitud de la llama, en metros;

V es el volumen del equipo, en m^3 .

La fórmula H.1 aplica para un venteo dispuesto horizontalmente. Para venteo vertical, se emplea la ecuación H.2:

$$L_F = 8 \times V^{1/3} \quad (\text{ec. H.2})$$

Las ecuaciones H.1 y H.2 son válidas para...

Para polvos con $K_{st} \leq 200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, la ecuación H.3 proporciona una estimación de la amplitud de la llama horizontal y verticalmente:

$$W_F \approx 8 \times V^{1/3} \quad (\text{ec. H.3})$$

donde:

W_F es la longitud de la llama, en metros;

V es el volumen del equipo, en m^3 .

Efectos de sobrepresión: pueden deberse al venteo de la explosión o a una explosión de una nube de polvo ya en el exterior del equipo. Deben calcularse ambas y emplear el valor más alto de sobrepresión

- Sobrepresión por la explosión de una nube de polvo en el área exterior del venteo:

La máxima sobrepresión externa puede estimarse según la ecuación H.4:

$$P_{ext.m\acute{a}x} = 0,2 \times P_{red.m\acute{a}x} \times A_v^{0,1} \times V^{0,18} \quad (\text{ec. H.4})$$

donde:

$P_{ext.m\acute{a}x}$ es la máxima sobrepresión externa, en barg;

$P_{red.m\acute{a}x}$, A_v y V son variables ya definidas en este trabajo

Se puede esperar esta sobrepresión máxima a una distancia dada por la ecuación H.5:

$$R_S = 0,25 \times L_F \quad (\text{ec. H.5})$$

A mayores distancias, r ($r > R_S$) del venteo, la sobrepresión disminuye de acuerdo con la ecuación H.6:

$$P_{ext.r} = P_{ext.m\acute{a}x} \times (R_S/r)^{1,5} \quad (\text{ec. H.6})$$

donde:

r es la distancia desde el panel de venteo, en metros.

Las ecuaciones H.4, H.5 y H.6 son válidas para:

- Sobrepresión por la explosión venteada:

La máxima sobrepresión externa puede estimarse según la ecuación H.7:

$$P_{ext.r} = 1,24 \times P_{red.m\acute{a}x} \times (D/r)^{1,35} / \left[1 + \left(\frac{\alpha}{56} \right)^2 \right] \quad (\text{ec. H.7})$$

donde

D es el diámetro hidráulico del venteo en metros;

α define la dirección con respecto al venteo;

$\alpha = 0^\circ$ significa enfrente del área de venteo;

$\alpha = 90^\circ$ significa enfrente oblicuo con respecto al venteo.

Los límites de aplicabilidad son los mismos que los de las ecuaciones H.4, H.5 y H.6.

H.2 NFPA 68

Dimensiones de la bola de fuego: a partir de la ecuación H.8 se puede calcular la máxima longitud axial, amplitud y altura de la zona de peligro de la bola de fuego alrededor de cada venteo (L_F):

$$L_F = K \times \left(\frac{V}{n}\right)^{1/3} \quad (\text{ec. H.8})$$

donde:

K es un factor de longitud de llama: 10 para polvos metálicos, 8 para polvos químicos y agrícolas;

n es el número de venteos independientes con el centro del venteo espaciado al menos 4 veces el diámetro hidráulico del mayor venteo.

Efecto de sobrepresión: la ecuación que proporciona la NFPA 68 es la misma que la H.4 de la norma europea. Para distancias mayores que $\alpha \cdot L_F$, la máxima presión externa puede calcularse como:

$$P_{m\acute{a}x.r} = P_{m\acute{a}x.a} \times \left(\alpha \times L_F / r\right) \quad (\text{ec. H.9})$$

donde:

P_{máx.r} es la máxima presión externa;

P_{máx.a} es la presión externa en barg;

α es 0,20 para venteos horizontales y 0,25 para venteos verticales (dirigidos hacia arriba);

r es la distancia desde el panel de venteo, en metros.

H.3 CÁLCULOS PARA LOS CASOS ESTUDIADOS

A continuación, se reflejan los resultados obtenidos para los dos silos, el filtro de mangas y el elevador de cangilones:

Tabla H.1. Resultados de distancia de llama y presión máxima en el exterior del equipo para los equipos estudiados

Equipo	Silo cilíndrico	Silo cilíndrico de base cónica	Filtro de mangas	Elevador de cangilones
W_F (EN 14491) [m]	19,8	18,6	34,6	9,3
L_F (NFPA 68) [m]	19,8	18,6	20,2	9,3
$P_{ext.máx}$ (EN 14491) [barg]	0,1	0,06	0,2	0,07
$P_{ext.máx}$ (NFPA 68) [barg]	0,1	0,1	0,1	0,05

Para los silos se ha considerado las ecuaciones para un único venteo dispuesto en orientación vertical, y para el filtro de mangas y el elevador de cangilones en posición horizontal. En el filtro de mangas se distribuye el área obtenida en el dimensionamiento del área de este equipo, 2 m², en cinco paneles de venteo de explosión (número empleado en el cálculo de la longitud de la llama según la NFPA 68).

Los resultados obtenidos constituyen una estimación para poder distribuir los equipos de forma que las consecuencias de una hipotética explosión no afecten a otros que puedan estar cercanos a ellos, en caso de instalarse en el exterior. En el Anexo J se encuentran las hojas de cálculo empleadas para obtener los resultados de la Tabla H.1.

ANEXO I: DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS DE VENTEO

I.1 EN 14491

La norma europea aporta como referencia la norma EN 14797 para el diseño de los dispositivos de venteo. Según esta norma:

Los dispositivos de venteo de explosión deben diseñarse de manera que abran cuando sean sometidos a una presión superior a su presión estática de activación (dentro de un rango de tolerancia definido de la presión estática de activación). Cualquier parte no diseñado para la ruptura no debe romperse. Los elementos de venteo deben diseñarse de manera que no deben fragmentar, produciendo proyectiles peligrosos.

La norma clasifica en dos los dispositivos de venteo de explosión:

a) Con elementos reutilizables

1. Dispositivos que automáticamente vuelven a su posición de cierre

Puertas de explosión con contrapesos: cubierta con bisagras que cubre el área de venteo y que generalmente vuelve a cerrar el área de venteo cayendo hacia atrás a su posición original tras el venteo, con ayuda de la gravedad. La cubierta debería ajustarse en o sobre un marco como medio de evitar fugas. El marco se utiliza para ajustar la puerta de explosión con contrapeso al área de venteo de explosión del recipiente protegido.

Puertas de explosión con muelles: en este caso la tapa cierra después de la explosión por la acción del ensamblaje con muelle. Pueden montarse en cualquier orientación.

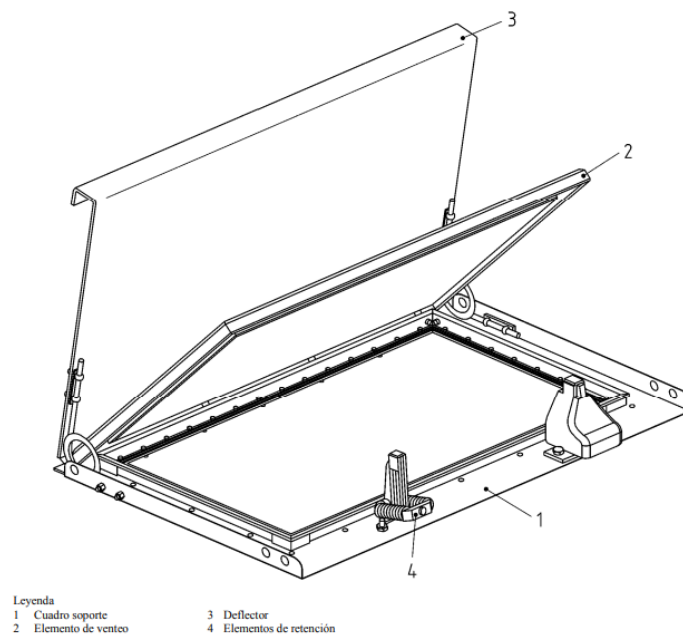
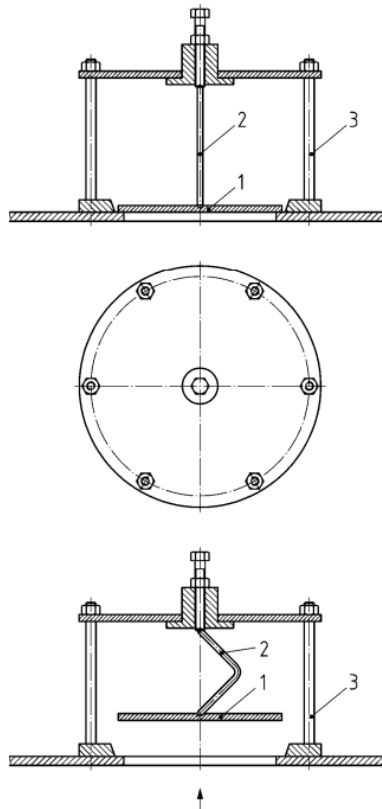


Figura I1. Puerta de explosión con muelles

2. Dispositivos que requieren un reposicionado manual de los elementos de retención

Dispositivos de varilla de torsión: tienen tres elementos: estructura soporte, elemento de venteo y varilla de torsión. La estructura de soporte sostiene los otros dos elementos, asegurando un sellado efectivo del elemento de venteo y actuando como un tope para la varilla de torsión. El elemento de venteo usualmente es libre de moverse en uno de los ejes cuando no está fijo por la varilla de torsión, siendo retenido en los otros dos ejes por el elemento de soporte. La varilla de torsión fija el elemento de venteo en su sitio hasta que se alcanza la presión prescrita. Esta es usualmente delgada y es el elemento de resistencia que se diseña para torcerse a la fuerza prescrita

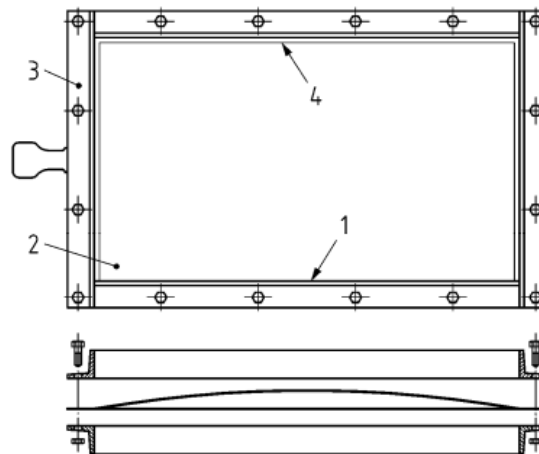


Leyenda
 1 Elemento de venteo
 2 Elemento de retención (varilla de torsión)
 3 Estructura soporte

Figura 1.2. Dispositivo de varilla de torsión

b) Con elementos no reutilizables

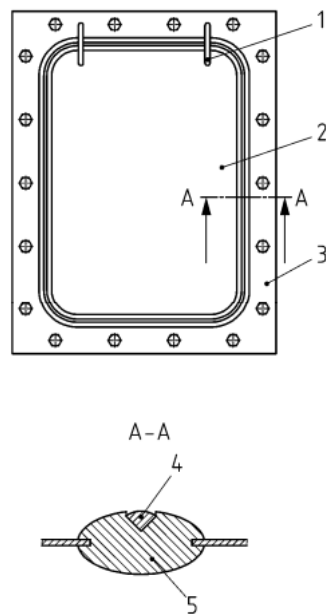
Dispositivos de paneles de ruptura: El panel se fija directamente, o mediante la ayuda de un marco soporte, al recinto a proteger. El panel se diseña para abrir a una presión predeterminada para proporcionar el área de venteo especificada cuando se abre. Normalmente el panel es plano, curvado o preformado con un borde formado para permitir su rotura y proporcionar el área de venteo requerida. Una vez abierto, el panel no puede volver a sellarse y es por tanto el elemento no reutilizable del dispositivo.



- Leyenda
- | | |
|---|--|
| 1 Lado fijado | 3 Marco de soporte |
| 2 Área del dispositivo de venteo de explosión | 4 Lados para romper durante el proceso de venteo |

Figura 1.3. Dispositivo de panel de ruptura

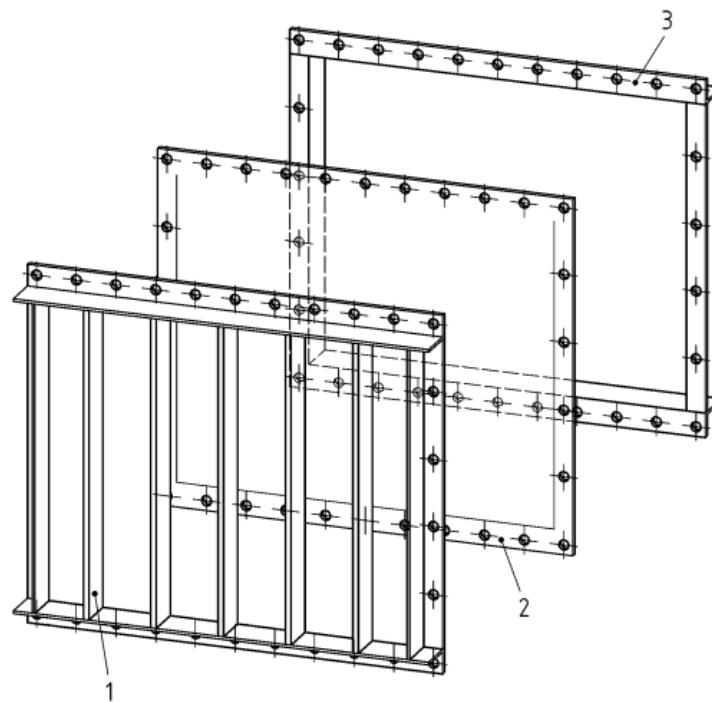
Dispositivos de panel desenchajable: se trata de paneles semirrígidos diseñados para curvarse cuando son sometidos a presión en el interior de la planta y salirse del sello de retención. Si se utiliza un sello de plástico flexible o de goma la presión de apertura dependerá del tamaño del panel y de las propiedades del sello



- Leyenda
- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| 1 Elemento de restricción | 4 Dispositivo de grapa |
| 2 Elemento de venteo | 5 Sello de plástico o goma |
| 3 Marco de soporte | |

Figura 24. Dispositivo de panel desenchajable

Soporte contra la contrapresión: previenen la ruptura de la membrana durante la aparición de presiones procedentes del exterior del equipo. Hay dos tipos diferentes de soportes contra la contrapresión: soportes contra contrapresión con apertura y sin apertura. Cuando el dispositivo de venteo de explosión se activa, un soporte contra la contrapresión con apertura debe abrir simultáneamente con el elemento de venteo. Los soportes contra la contrapresión sin apertura permanecen en su sitio después de la activación del elemento de venteo. Su presencia debe considerarse al determinar la eficiencia de venteo del dispositivo.



Leyenda
1 Soporte contra la contrapresión
2 Panel de venteo
3 Marco de soporte

Figura 25. Soporte contra la contrapresión

La norma también estipula que el fabricante de los dispositivos de venteo debe proporcionar la siguiente información de utilización:

- nombre y dirección del fabricante, así como toda información adicional apropiada para facilitar el montaje y la instalación;
- marcado CE;
- designación de la serie o tipo de dispositivo para el que se aplican las instrucciones;
- año de construcción;
- marcado específico de protección contra la explosión 'Ex' seguido del símbolo del grupo del equipo y categoría;

- todo aviso o información esencial para el uso seguro del dispositivo

Además, se aportan instrucciones relativas a la inspección y mantenimiento de los dispositivos de venteo, debiendo realizarse al menos una inspección anual por personal cualificado.

I.2 NFPA 68

La norma estadounidense no describe tan a fondo las propiedades de los dispositivos de venteo de explosión. Se limita a aportar recomendaciones relativas a la inspección y mantenimiento de los dispositivos, así como la documentación que debe incluir el fabricante, que comprende, principalmente lo siguiente:

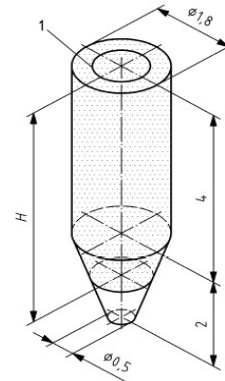
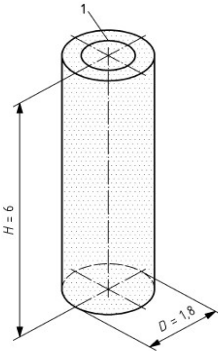
- Hojas de datos del fabricante y manuales de instrucciones
- Cálculos de diseño
- Características generales
- Características del dispositivo de venteo
- Formularios de inspección/mantenimiento para el usuario
- Documentación de usuario de conformidad con las normas aplicables
- Identificación del dispositivo de venteo

ANEXO J: HOJAS DE CÁLCULO

En este anexo se encuentran las hojas de cálculo empleadas para realizar los cálculos del presente trabajo, tanto sobre el dimensionamiento del área de venteo de explosión, como de las consecuencias de explosión estudiadas en el Anexo H.

DATOS DEL EQUIPO			DATOS DE EXPLOSIVIDAD DEL POLVO			DATOS DEL PANEL DE VENTEO		
DATO	VALOR	UNIDADES	DATO	VALOR	UNIDADES	DATO	VALOR	UNIDADES
Predmax	0,3	barg	Kst	138	bar.m.s ⁻¹	Ef	1	-
Silo cilíndrico			Pmax	8,5	barg	Pstat	0,1	barg
H	6	m				M	5	kg/m ²
D	1,8	m						
L/D silo cilíndrico (EN-14491)*	3,3	-						
L/D (NFPA 68)**	3,3	-						
Volumen total	15,3	m ³						
Silo cilíndrico de fondo cónico								
L _{total}	6	m						
φ ₁	1,8	m						
φ ₂	0,5	m						
L _{cono}	2	m						
L _{cilindro}	4	m						
H	4,7	m						
V _{eff}	10,9	m ³						
A _{eff}	2,3	m ²						
D _{eff}	1,7	m						
Volumen total	12,5	m ³						
L/D (EN-14491)*	2,7	-						
V _{eff} NFPA 68	12,5	-						
A _{eff}	2,1	-						
D _{he}	1,6	-						
L/D (NFPA 68)**	3,7	-						

P _{inicial}	0	barg
Q	5	m ³ /s
n	1	-
D	1,6	-



1. CÁLCULO SEGÚN EN-14491
Silo cilíndrico

Las siguientes fórmulas son para un equipo completamente lleno, para una nube turbulenta de polvo con una concentración de polvo óptima

a) Para presiones predmax entre 0,1 bar y 1,5 bar

Parámetro	Valor	Unidades
A	1,5	m ²
B	0,6	adim
C	3,0	adim

$$A = B(1 + C \times \log L/D)$$

$$B = [3,264 \cdot 10^{-5} \times pmax \times Kst \times predmax^{-0,569} + 0,27 \times (pstat - 0,1) \times predmax^{-0,5}] \times V^{0,753}$$

$$C = (-4,305 \times \log predmax + 0,758)$$

b) Para presiones predmax entre 1,5 bar y 2,0 bar

Parámetro	Valor	Unidades
A	Fuera de rango	m ²
B	Fuera de rango	adim

$$A = B$$

Av	1,5	m ²
-----------	------------	----------------

Área de venteo teniendo en cuenta la eficiencia de venteo

Silo cilíndrico de base cónica

Las siguientes fórmulas son para un equipo completamente lleno, para una nube turbulenta de polvo con una concentración de polvo óptima

a) Para presiones predmax entre 0,1 bar y 1,5 bar

Parámetro	Valor	Unidades
A	1,1	m ²
B	0,5	adim
C	3,0	adim

$$A = B(1 + C \times \log L/D)$$

$$B = [3,264 \cdot 10^{-5} \times pmax \times Kst \times predmax^{-0,569} + 0,27 \times (pstat - 0,1) \times predmax^{-0,5}] \times V^{0,753}$$

$$C = (-4,305 \times \log predmax + 0,758)$$

b) Para presiones predmax entre 1,5 bar y 2,0 bar

Parámetro	Valor	Unidades
A	Fuera de rango	m ²
B	Fuera de rango	adim

$$A = B$$

Av	1,06	m ²
-----------	-------------	----------------

Área de venteo teniendo en cuenta la eficiencia de venteo

Las fórmulas son válidas en las siguientes condiciones:	
- Volumen del equipo:	0,1 m ³ ≤ V ≤ 10000 m ³
- Presión estática de activación del dispositivo de venteo:	0,1 bar ≤ pstat ≤ 1 bar para pstat < 0,1 bar, usar pstat = 0,1 bar
- Máxima sobrepresión reducida de explosión:	0,1 bar ≤ predmax ≤ 2 bar, predmax debe ser al menos pstat + 2 veces el rango de tolerancia de pstat
- Kst y máxima sobrepresión de explosión:	5 bar ≤ pmax ≤ 12 bar, para 300 bar.m.s ⁻¹ ≤ Kst ≤ 800 bar
- Condiciones iniciales del proceso:	presión absoluta ≤ 110 kPa concentración oxígeno ≤ 21% Temperatura entre -20°C y +60°C
- Relación longitud diámetro del recipiente:	1 ≤ L/D ≤ 20

2. CÁLCULO SEGÚN NFPA 68

Silo cilíndrico

Av0

a) Para presiones cercanas a la atmosférica (entre -0,2 barg y +0,2 barg)

Parámetro	Valor	Unidades
Av0	0,6	m ²

b) Para presiones elevadas o subatmosféricas (< -0,2 barg o > +0,2 barg)

Parámetro	Valor	Unidades
Av0	Fuera de rango	m ²
Peff	0,04	-
Peff	0	barg
PEmax	8,5	barg

Para presiones iniciales por debajo de los -0,2 barg se permite determinar el área mínima de venteo mediante la ecuación a)

Av0	0,6	m ²
-----	-----	----------------

Av1

a) Si $L/D \leq 2$

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	Fuera de rango	m ²

b) Si $2 < L/D \leq 6$

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	1,00	m ²

b.1) Si $P_{inicial} < 0,2$

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	1,0	m ²

Av1	1,0	m ²
-----	-----	----------------

Av2

Parámetro	Valor	Unidades
Av2	1,0	m ²

Av3

Parámetro	Valor	Unidades
Av3	1,0	m ²

Av4

Parámetro	Valor	Unidades
Av4	1,0	m ²

Avf

Parámetro	Valor	Unidades
Avf	1,0	m ²

2. CÁLCULO SEGÚN NFPA 68

Silo cilíndrico de base cónica

Av0

a) Para presiones cercanas a la atmosférica (entre -0,2 barg y +0,2 barg)

Parámetro	Valor	Unidades
Av0	0,5	m ²

b) Para presiones elevadas o subatmosféricas (< -0,2 barg o > +0,2 barg)

Parámetro	Valor	Unidades
Av0	Fuera de rango	m ²
Peff	0,04	-
Peff	0	barg
PEmax	8,5	barg

Para presiones iniciales por debajo de los -0,2 barg se permite determinar el área mínima de venteo mediante la ecuación a)

Av0	0,5	m ²
------------	-----	----------------

Av1

a) Si $L/D \leq 2$

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	Fuera de rango	m ²

b) Si $2 < L/D \leq 6$

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	0,9	m ²

b.1) Si $P_{inicial} < 0,2$

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	0,9	m ²

Av1	0,9	m ²
------------	-----	----------------

Av2

Parámetro	Valor	Unidades
Av2	0,9	m ²

Av3

Parámetro	Valor	Unidades
Av3	0,9	m ²

Av4

Parámetro	Valor	Unidades
Av4	0,9	m ²

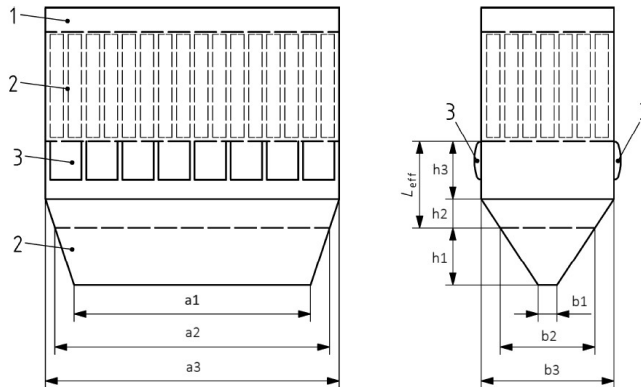
Avf

Parámetro	Valor	Unidades
Avf	0,9	m ²

EFECTO DE CONDUCTO DE VENTEO							
Silo cilíndrico							
P' red.máx	P red.máx	A	V	l	d	l/d	
0,589929458	0,3	1,52	15,2681403	0,761069035	1,52	0,5	
0,60476022	<p>La Pred.máx se incrementa con la longitud del conducto de venteo. No hay efecto en la Pred.máx si l/d del conducto es $\leq 0,5$ siempre que el volumen del conducto de venteo sea menor que el del equipo protegido</p>			0,8		0,525576501	
0,642855247				0,9		0,591273563	
0,680950274				1		0,656970626	
0,719045302				1,1		0,722667688	
0,757140329				1,2		0,788364751	
0,795235357				1,3		0,854061814	
0,833330384				1,4		0,919758876	
0,871425412				1,5		0,985455939	
0,909520439				1,6		1,051153001	
0,947615467				1,7		1,116850064	
0,985710494				1,8		1,182547127	
1,023805521				1,9		1,248244189	
1,061900549		<p>Válida en las siguientes condiciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Volumen: $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 10000 \text{ m}^3$ - l/d del conducto: 0,5-20 - l del conducto: $l \leq 10 \text{ m}$ - pstat: $0,1 \text{ bar} \leq p_{\text{stat}} \leq 1 \text{ bar}$ - predmax' $\leq 2 \text{ bar}$ - predmax entre 0,1 bar y 2 bar - Pmáx: 5-12 barg 			2		1,313941252
1,099995576					2,1		1,379638314
1,138090604					2,2		1,445335377
1,176185631					2,3		1,511032439
1,214280659					2,4		1,576729502
1,252375686				2,5		1,642426565	
1,290470714				2,6		1,708123627	
1,328565741				2,7		1,77382069	
1,366660768				2,8		1,839517752	
1,404755796				2,9		1,905214815	
1,442850823				3		1,970911878	
1,480945851				3,1		2,03660894	
1,519040878				3,2		2,102306003	
1,557135906				3,3		2,168003065	
1,595230933				3,4		2,233700128	
1,63332596				3,5		2,299397191	
1,671420988				3,6		2,365094253	
1,709516015			3,7		2,430791316		
1,747611043			3,8		2,496488378		
1,78570607			3,9		2,562185441		
1,823801098			4		2,627882503		
1,861896125			4,1		2,693579566		
1,899991153			4,2		2,759276629		
1,93808618			4,3		2,824973691		
1,976181207			4,4		2,890670754		

EFECTO DE CONDUCTO DE VENTEO							
Silo cilíndrico							
Avf	E ₁	E ₂	K	f _D	L _{conducto}	D _h	Rugosidad (ε)
0,956277714	1,707415293	0	0	0,0682586	0	1,103435817	0,05
0,971163299	1,733993215	0,006360718	0,006186		0,1		
0,984514059	1,757830739	0,012896319	0,012372		0,2		
0,997598768	1,781193233	0,019601577	0,018558		0,3		
1,010651675	1,804498945	0,026477401	0,024744		0,4		
1,023782983	1,82794464	0,033526774	0,03093		0,5		
1,037059965	1,851650433	0,040753881	0,037116		0,6		
1,050530407	1,875701647	0,048163776	0,043302		0,7		
1,064231959	1,900165502	0,055762231	0,049488		0,8		
1,078196601	1,925099098	0,063555674	0,055674		0,9		
1,092453073	1,950553753	0,071551155	0,06186		1		
1,107028323	1,976577579	0,079756351	0,068046		1,1		
1,121948442	2,003217162	0,088179576	0,074232		1,2		
1,137239318	2,030518723	0,096829809	0,080418		1,3		
1,15292712	2,058528989	0,105716737	0,086604		1,4		
1,169038691	2,087295886	0,114850794	0,09279		1,5		
1,185601878	2,116869136	0,124243226	0,098976		1,6		
1,202645835	2,14730079	0,133906152	0,105162		1,7		
1,220201309	2,178645749	0,143852644	0,111348		1,8		
1,238300929	2,210962269	0,154096813	0,117534		1,9		
1,256979503	2,244312498	0,16465391	0,12372		2		
1,276274331	2,27876304	0,175540442	0,129906		2,1		
1,296225556	2,314385565	0,1867743	0,136092		2,2		
1,316876537	2,35125749	0,198374915	0,142278		2,3		
1,338274276	2,389462737	0,210363423	0,148464		2,4		
1,3604699	2,429092594	0,22276287	0,15465		2,5		
1,383519208	2,470246686	0,235598434	0,160836		2,6		
1,407483302	2,51303411	0,248897694	0,167022		2,7		
1,432429315	2,557574732	0,262690937	0,173208		2,8		
1,458431264	2,604000707	0,277011514	0,179394		2,9		
1,485571042	2,652458255	0,291896265	0,18558		3		
1,513939601	2,703109765	0,307386012	0,191766		3,1		
1,543638337	2,756136282	0,323526152	0,197952		3,2		
1,57478077	2,811740491	0,340367356	0,204138		3,3		
1,60749454	2,870150293	0,357966414	0,210324		3,4		
1,641923853	2,931623162	0,37638726	0,21651		3,5		
1,678232444	2,996451448	0,395702206	0,222696		3,6		
1,716607255	3,064968927	0,415993482	0,228882		3,7		
1,757262987	3,137558947	0,437355121	0,235068		3,8		
1,800447842	3,214664668	0,459895341	0,241254		3,9		
1,846450805	3,296802065	0,483739544	0,24744		4		
1,895611018	3,384576671	0,509034173	0,253626		4,1		
1,948330004	3,478705397	0,535951718	0,259812		4,2		
2,005087856	3,580045439	0,564697312	0,265998		4,3		
2,066465032	3,689633195	0,595517592	0,272184		4,4		
2,133172303	3,808737733	0,628712808	0,27837		4,5		
2,20609279	3,938935847	0,664653759	0,284556		4,6		
2,286342542	4,082220221	0,703806078	0,290742		4,7		
2,37536048	4,241160022	0,746766147	0,296928		4,8		
2,475046826	4,419148057	0,794316087	0,303114		4,9		
2,587985574	4,620797998	0,847511722	0,3093		5		

DATOS DEL EQUIPO			DATOS DE EXPLOSIVIDAD DEL POLVO			DATOS DEL PANEL DE VENTEO		
DATO	VALOR	UNIDADES	DATO	VALOR	UNIDADES	DATO	VALOR	UNIDADES
$P_{red.m\acute{a}x}$	0,3	barg	Kst	138	$bar.m.s^{-1}$	Ef	1	-
Filtro de mangas			Pmax	8,5	barg	Pstat	0,1	barg
h1	1,2	m				M	5	kg/m^2
h2	0,6	m						
h3	4	m						
Leff	4,6	m						
a1	0,5	m						
a2	5,8	m						
a3	6,2	m						
b1	0,4	m						
b2	2	m						
b3	2,8	m						
V1	69,4	m^3						
V2	3,9	m^3						
Ve _{eff}	73,3	m^3						
A _{eff}	15,9	m^2						
De _{eff}	4,5	m						
L/D filtro (EN-14491)*	1,0	-						
H	5,8	-						
Ve _{eff} NFPA 68	81,1	m^3						
A _{eff}	14,0	m^2						
Dhe	3,7	m						
L/D (NFPA 68)**	1,6	-						
P _{inicial}	0	barg						
Q	5	m^3/s						
n	1	-						
D	3,7	m						



1. CÁLCULO SEGÚN EN-14491

Filtro de mangas

Las siguientes fórmulas son para un equipo completamente lleno, para una nube turbulenta de polvo con una concentración de polvo óptima

a) Para presiones $pred_{max}$ entre 0,1 bar y 1,5 bar

Parámetro	Valor	Unidades
A	2,0	m^2
B	1,9	adim
C	3,0	adim

$$A = B(1 + C \times \log L/D)$$

$$B = [3,264 \cdot 10^{-5} \times p_{max} \times Kst \times pred_{max}^{-0,569} + 0,27 \times (pstat - 0,1) \times pred_{max}^{-0,5}] \times V^{0,753}$$

$$C = (-4,305 \times \log pred_{max} + 0,758)$$

b) Para presiones $pred_{max}$ entre 1,5 bar y 2,0 bar

Parámetro	Valor	Unidades
A	Fuera de rango	m^2
B	Fuera de rango	adim

$$A = B$$

Av **2,0** m^2

Área de venteo teniendo en cuenta la eficiencia de venteo

Las fórmulas son válidas en las siguientes condiciones:

- Volumen del equipo: $0,1 m^3 < V <= 10000 m^3$
- Presión estática de activación del dispositivo de venteo: $0,1 bar <= pstat <= 1 bar$
para $pstat < 0,1 bar$, usar $pstat = 0,1 bar$
- Máxima sobrepresión reducida de explosión: $0,1 bar < pred_{max} <= 2 bar$,
 $pred_{max}$ debe ser al menos $pstat + 2$ veces el rango de tolerancia de $pstat$
- Kst y máxima sobrepresión de explosión: $5 bar <= pmax <= 12 bar$, para
 $300 bar.m.s^{-1} <= Kst <= 800 bar$
- Condiciones iniciales del proceso: presión absoluta $<= 110 kPa$
concentración oxígeno $<= 21\%$
Temperatura entre $-20^\circ C$ y $+60^\circ C$
- Relación longitud diámetro del recipiente: $1 <= L/D <= 20$

2. CÁLCULO SEGÚN NFPA 68

Filtro de mangas

Av0

a) Para presiones cercanas a la atmosférica (entre -0,2 barg y +0,2 barg)

Parámetro	Valor	Unidades
Av0	2,1	m ²

b) Para presiones elevadas o subatmosféricas (< -0,2 barg o > +0,2 barg)

Parámetro	Valor	Unidades
Av0	Fuera de rango	m ²
P _{leff}	0,04	-
P _{eff}	0	barg
P _E max	8,5	barg

Para presiones iniciales por debajo de los -0,2 barg se permite determinar el área mínima de venteo mediante la ecuación a)

Av0	2,1	m ²
------------	-----	----------------

Av1

a) Si L/D ≤ 2

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	2,1	m ²

b) Si 2 < L/D ≤ 6

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	Fuera de rango	m ²

b.1) Si P_{inicial} < 0,2

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	Fuera de rango	m ²

Av1	2,1	m ²
------------	-----	----------------

Av2

Parámetro	Valor	Unidades
Av2	2,089061276	m ²

Av3

Parámetro	Valor	Unidades
Av3	2,1	m ²

Av4

Parámetro	Valor	Unidades
Av4	2,1	m ²

Avf

Parámetro	Valor	Unidades
Avf	2,1	m ²

DATOS DEL EQUIPO			DATOS DE EXPLOSIVIDAD DEL POLVO			DATOS DEL PANEL DE VENTEO		
DATO	VALOR	UNIDADES	DATO	VALOR	UNIDADES	DATO	VALOR	UNIDADES
Predmax	0,3	barg	Kst	138	bar.m.s ⁻¹	Ef	1	-
Elevador de cangilones			Pmax	8,5	barg	Pstat	0,1	barg
H1=H2	4,5	m				M	5	kg/m ²
a	0,5	m						
b	0,7	m						
Veff1=Veff2	1,575	m3						
Aeff	0,35	m2						
Deff	0,667558118	m						
L/D elevador (EN-14491)*	6,7	-						
L/D (NFPA 68)**	7,6	-						
P_inicial	0	barg						
Q	5	m ³ /s						
n	1	-						

1. CÁLCULO SEGÚN EN-14491
Elevador de cangilones

Las siguientes fórmulas son para un equipo completamente lleno, para una nube turbulenta de polvo con una concentración de polvo óptima

a) Para presiones predmax entre 0,1 bar y 1,5 bar

Parámetro	Valor	Unidades
A	0,4	m ²
B	0,1	adim
C	3,0	adim

$$A = B(1 + C \times \log L/D)$$

$$B = [3,264 \cdot 10^{-5} \times pmax \times Kst \times predmax^{-0,569} + 0,27 \times (pstat - 0,1) \times predmax^{-0,5}] \times V^{0,753}$$

$$C = (-4,305 \times \log predmax + 0,758)$$

b) Para presiones predmax entre 1,5 bar y 2,0 bar

Parámetro	Valor	Unidades
A	Fuera de rango	m ²
B	Fuera de rango	adim

$$A = B$$

Av	0,4	m ²
-----------	------------	----------------

Área de venteo teniendo en cuenta la eficiencia de venteo

Las fórmulas son válidas en las siguientes condiciones:

- Volumen del equipo: 0,1 m³ <= V <= 10000 m³
- Presión estática de activación del dispositivo de venteo: 0,1 bar <= pstat <= 1 bar
para pstat < 0,1 bar, usar pstat = 0,1 bar
- Máxima sobrepresión reducida de explosión: 0,1 bar < predmax <= 2 bar,
predmax debe ser al menos pstat + 2 veces el rango de tolerancia de pstat
- Kst y máxima sobrepresión de explosión: 5 bar <= pmax <= 12 bar, para
300 bar.m.s⁻¹ <= Kst <= 800 bar
- Condiciones iniciales del proceso: presión absoluta <= 110 kPa
concentración oxígeno <= 21%
Temperatura entre -20°C y +60°C
- Relación longitud diámetro del recipiente: 1 <= L/D <= 20

2. CÁLCULO SEGÚN NFPA 68

Elevador de cangilones

Av0

a) Para presiones cercanas a la atmosférica (entre -0,2 barg y +0,2 barg)

Parámetro	Valor	Unidades
Av0	0,1	m ²

b) Para presiones elevadas o subatmosféricas (< -0,2 barg o > +0,2 barg)

Parámetro	Valor	Unidades
Av0	Fuera de rango	m ²
Peff	0,04	-
Peff	0	barg
PEmax	8,5	barg

Para presiones iniciales por debajo de los -0,2 barg se permite determinar el área mínima de venteo mediante la ecuación a)

Av0	0,1	m ²
-----	-----	----------------

Av1

a) Si $L/D \leq 2$

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	Fuera de rango	m ²

b) Si $2 < L/D \leq 8$

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	0,29	m ²

b.1) Si P inicial < 0,2

Parámetro	Valor	Unidades
Av1	Fuera de rango	m ²

Av1	0,3	m ²
-----	-----	----------------

Av2

Parámetro	Valor	Unidades
Av2	0,3	m ²

Av3

Parámetro	Valor	Unidades
Av3	0,3	m ²

Av4

Parámetro	Valor	Unidades
Av4	0,3	m ²

Avf

Parámetro	Valor	Unidades
Avf	0,3	m ²

EFECTOS DE LA EXPLOSIÓN SILO CILÍNDRICO (EN 14491)					
Efectos de llama					
Venteo horizontal			Para polvos con KSt<200		Venteo vertical
Lf		m	Wf (m)		m
	24,80820721		19,8465658		19,846566
Efectos de sobrepresión por la explosión de la nube de polvo fuera del venteo					
	pextmax		0,10220642		bar
	Rs (horizontal)		6,2020518		m
	Rs (vertical)		4,96164144		m
	r		10		m
	pext, r (horizontal)		0,04992077		bar
	pext, r (vertical)		0,03572039		bar
Efectos de sobrepresión por la explosión venteada					
	Dhidráulico venteo		1,39213734		m
	alfa		0		º
	Pext.r		0,13190321		barg
EFECTOS DE LA EXPLOSIÓN SILO CILÍNDRICO DE BASE CÓNICA (EN 14491)					
Efectos de llama					
Venteo horizontal			Para polvos con KSt<200		Venteo vertical
Lf		m	Wf (m)		m
	23,19392356		18,5551388		18,555139
Efectos de sobrepresión por la explosión de la nube de polvo fuera del venteo					
	pextmax		0,09503903		bar
	Rs (horizontal)		5,79848089		m
	Rs (vertical)		4,63878471		m
	r		10		m
	pext, r (horizontal)		0,04196366		bar
	pext, r (vertical)		0,03002675		bar
Efectos de sobrepresión por la explosión venteada					
	Dhidráulico venteo		1,16064249		m
	alfa		0		º
	Pext.r		0,05731129		barg
EFECTOS DE LA EXPLOSIÓN SILO CILÍNDRICO (NFPA 68)					
Efectos de llama					
Para polvos					
	Lf (m)		19,8465658		
Efectos de sobrepresión por la explosión de la nube de polvo fuera del venteo					
	pextmax		0,10220642		bar
EFECTOS DE LA EXPLOSIÓN SILO CILÍNDRICO DE BASE CÓNICA (NFPA 68)					
Efectos de llama					
Para polvos					
	Lf (m)		18,5551388		
Efectos de sobrepresión por la explosión de la nube de polvo fuera del venteo					
	pextmax		0,09503903		bar

EFECTOS DE LA EXPLOSIÓN FILTRO DE MANGAS (EN 14491)							
Efectos de llama							
Venteo horizontal			Para polvos con KSt<200	Venteo vertical			
Lf	41,85525877	m	Wf (m)	34,627374	Lf	34,627374	m
Efectos de sobrepresión por la explosión de la nube de polvo fuera del venteo							
pextmax	0,14172512	bar					
Rs (horizontal)	10,4638147	m					
Rs (vertical)	8,65684351	m					
r	10	m					
pext, r (horizontal)	0,15169871	bar					
pext, r (vertical)	0,1141527	bar					
Efectos de sobrepresión por la explosión venteada							
Dhidráulico venteo	1,5879732	m					
alfa	0	e					
Pext.r	0,18753308	barg					
EFECTOS DE LA EXPLOSIÓN FILTRO DE MANGAS (NFPA 68)							
Efectos de llama							
			Para polvos				
Lf (m)			20,2502112				
Efectos de sobrepresión por la explosión de la nube de polvo fuera del venteo							
pextmax	0,14172512	bar					

EFECTOS DE LA EXPLOSIÓN ELEVADOR DE CANGILONES (EN 14491)							
Efectos de llama							
Venteo horizontal			Para polvos con KSt<200		Venteo vertical		
Lf		m	Wf (m)		Lf		m
	11,63483386			9,30786709		9,3078671	
Efectos de sobrepresión por la explosión de la nube de polvo fuera del venteo							
	pextmax		0,05900668				bar
	Rs (horizontal)		2,90870846				m
	Rs (vertical)		2,32696677				m
	r		10				m
	pext, r (horizontal)		0,0092566				bar
	pext, r (vertical)		0,00662348				bar
Efectos de sobrepresión por la explosión venteada							
	Dhidráulico venteo		0,6896874				m
	alfa		0				º
	Pext.r		0,05330013				barg
EFECTOS DE LA EXPLOSIÓN ELEVADOR DE CANGILONES (NFPA 68)							
Efectos de llama							
Para polvos							
	Lf (m)						9,30786709
Efectos de sobrepresión por la explosión de la nube de polvo fuera del venteo							
	pextmax		0,05900668				bar