

Electricidad estática en polvos combustibles (I): características de las descargas electrostáticas

Electricité statique en poudres combustibles (I). Caractéristiques des décharges électrostatiques
Static electricity in combustible dusts(I). Characteristics of the electrostatic discharges

Redactor:

Emilio Turmo Sierra
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE
CONDICIONES DE TRABAJO

Esta Notas Técnicas de Prevención y la siguiente son las primeras de una serie que tratan sobre los riesgos de la electricidad estática en la industria y tienen por objetivo exponer la generación y acumulación de cargas electrostáticas que dan lugar a una de las fuentes de ignición que pueden ser causa de incendio y explosión en las plantas de proceso con polvos combustibles. Se describen los tipos de descargas electrostáticas que pueden aparecer y las medidas de seguridad que se pueden adoptar. La bibliografía se incluye en la NTP siguiente. Se recomienda consultar la NTP 567: Protección frente a cargas electrostáticas.

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la electricidad estática puede ser fuente de ignición cuando se manifiesta en presencia de atmósferas explosivas de gases, vapores y nieblas inflamables o de polvos combustibles, pudiendo dar lugar a incendios y explosiones. Estos accidentes pueden ocurrir en la industria farmacéutica, agropecuaria, alimentaria, automovilística y, en general, en todas las operaciones que manipulen materia combustible finamente dividida (desde polvo fino hasta gránulos, fibras o virutas de tamaño inferior a 0,5 mm). Las partículas pueden ser de productos variados tanto orgánicos como inorgánicos. Ejemplos diversos son la leche en polvo, el tóner de las impresoras láser, el polvo de aluminio y magnesio de la mecanización de piezas, el pienso, el serrín, el polvo de trituración de plásticos, etc.

2. GENERACIÓN Y ACUMULACIÓN DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS. DISIPACIÓN Y TIEMPO DE RELAJACIÓN

La carga electrostática generada por contacto y roce de partículas con superficies de diferentes materiales es un fenómeno frecuente en los procesos con polvos. Ocurre si la *resistividad volumétrica* (resistividad o resistencia específica) del polvo es superior a unos $10^8 \Omega \cdot m$, valor que es sobrepasado por la mayoría de sustancias orgánicas. Las operaciones de manipulación y transporte implican procesos de separación entre las propias partículas y entre éstas y las superficies de los equipos y conducciones de la instalación. En la Tabla 1 se presentan valores, para diferentes operaciones, de *densidad de carga por unidad de masa* en C/kg, adquirida por polvos de resistividad media (10^6 a $10^{10} \Omega \cdot m$), rango donde se encuentran la mayoría de polvos orgánicos naturales. Este parámetro es importante al considerar el nivel de acumulación de carga en polvos.

Operación	Densidad de carga máscica o carga específica (C/kg)
Tamizado	10^{-9} a 10^{-11}
Llenado	10^{-7} a 10^{-9}
Transporte de alimentación por tornillo helicoidal	10^{-6} a 10^{-8}
Trituración, molienda	10^{-6} a 10^{-7}
Micronizado	10^{-4} a 10^{-7}
Transporte neumático	10^{-3} a 10^{-7}
Recubrimiento triboeléctrico de polvo	10^{-2} a 10^{-3}

Tabla 1. Densidad de carga máscica en operaciones con polvos

La carga generada en un elemento no conductor queda retenida debido a su propia resistencia. La carga de las partículas, especialmente si están depositadas en un recipiente de recogida, se va disipando o descargando (proceso de relajación) a una determinada tasa, el valor de la cual depende de la resistencia de las partículas componentes del sistema.

El tiempo que tarda la carga en decaer a un valor igual a su valor original dividido por el número e (2,718) recibe el nombre de *tiempo de relajación* (τ):

$$\tau = \rho_v \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0$$

ϵ = permitividad relativa del polvo (adimensional)
 ϵ_0 = permitividad del vacío ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m)
 ρ_v = resistividad volumétrica del polvo ($\Omega \cdot m$)

Ejemplo: Un polvo con resistividad volumétrica ρ_v de $10^{10} \Omega \cdot m$ y una permitividad relativa ϵ de 2 necesitaría un tiempo de relajación:

$$\tau = 10^{10} \Omega \cdot m \cdot 2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} F/m = 0,177 \Omega \cdot F \sim 0,2 s^{(1)}$$

Esto significa que después de transcurridos unos 0,2 s, aproximadamente dos tercios ($1 - 1/2,718$) de la carga se habrán descargado desde el polvo a granel hacia tierra.

Se debe observar que, siendo el aire muy mal conductor (resistividad del aire: $2 \cdot 10^{13}$ a $4 \cdot 10^{13} \Omega \cdot m$), el decaimiento de la carga acumulada en un polvo en suspensión en el aire (nube de polvo) no está influenciado por la resistividad volumétrica del polvo.

Los niveles de carga a que se puede llegar, tanto en el polvo a granel depositado o en suspensión en aire, están limitados por el desencadenamiento de la descarga elec-

trostática. Esto ocurrirá cuando el campo eléctrico alcance la intensidad de disrupción dieléctrica del aire 3 MV/m (rigidez dieléctrica o voltaje de ruptura), sea en el borde del montón de polvo depositado en un recipiente o en la nube de polvo.

3. TIPOS DE DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS

En general todas las partículas, incluyendo gránulos, virutas y fibras, se cargan fácilmente durante el transporte a través de tuberías y conductos. Esto ocurre en mayor grado cuando las partículas permanecen bien separadas unas de otras, como en el transporte neumático.

Los polvos se pueden inflamar más fácilmente por descargas electrostáticas cuando están en suspensión en el aire, en forma de partículas finas o en estado de baja turbulencia que cuando están depositados en forma de capa. Estas descargas pueden adoptar diferentes formas con poder de ignición también distinto (Tabla 2).

1. La conversión de unidades demuestra que $\Omega \cdot F = V/A \cdot C/V = C/A = C/(C/s) = s$.

TIPO DE DESCARGA	CARACTERÍSTICAS
DESCARGA EN CHISPA	<ul style="list-style-type: none"> Puede ocurrir debido a las cargas adquiridas por componentes conductores de equipos, por personas o por acumulación de carga en polvos de baja resistividad (resistividad volumétrica $\leq 10^8 \Omega \cdot m$). En la mayoría de los casos, toda la energía almacenada se disipa en la chispa. Puede ocurrir entre dos conductores situados a corta distancia y se manifiesta como una descarga luminosa y con ruido de chispazo. En general la energía liberada por una descarga en chispa es demasiado baja para la ignición de polvo en forma de capa o a granel en un montón, pero es suficiente para la ignición de una nube de polvo. No se han detectado descargas en chispa procedentes de una nube de polvo.
DESCARGA EN CORONA	<ul style="list-style-type: none"> Puede ocurrir en elementos puntiagudos o extremos de conductores, es decir superficies de radio de curvatura pequeño ($< 0,5$ mm). Se observa cuando esos conductores están conectados a tierra y se aproximan a un objeto con carga electrostática elevada, o cuando el conductor puntiagudo está a un potencial elevado. En estos casos la descarga se produce debido al campo eléctrico muy intenso que existe en la superficie puntiaguda, superior a 3 MV/m. La intensidad del campo disminuye rápidamente y la región ionizada de la descarga desaparece a poca distancia. Se puede observar una pequeña luminosidad entre la punta y el objeto cargado o desde la punta a elevado potencial en dirección hacia fuera. La energía de esta descarga es muy baja, por lo que su poder de ignición es demasiado bajo para la ignición de polvos combustibles. Sólo en los casos en que haya un incremento del potencial en el conductor puntiagudo, la corona se puede transformar en chispa entre la punta y otro objeto.
DESCARGA EN BROCHA	<ul style="list-style-type: none"> Puede ocurrir cuando conductores redondeados (radio de curvatura > 5 mm) y puestos a tierra se aproximan hacia objetos no conductores cargados. P.e. el acercamiento de una herramienta o la punta de un dedo, a una superficie aislante altamente cargada, el sacudimiento de bolsas de plástico al final de un vaciado de polvo en la boca de un reactor, el descenso de una sonda de medida del nivel de llenado de un silo. A diferencia de las descargas en chispa, en la de brocha sólo se descarga una fracción de la carga acumulada, la correspondiente a la zona más cercana al elemento conductor que se aproxima. Este tipo de descargas liberan energías equivalentes a 4 mJ. El conocimiento actual permite decir que los polvos combustibles con Energía Mínima de Ignición EMI superior a 4 mJ no entrarán en ignición con descargas en brocha excepto si están en mezcla con gases y vapores inflamables. La presencia de un gas inflamable junto a polvo combustible rebaja la EMI correspondiente al polvo, aun cuando la concentración del gas sea inferior al Límite Inferior de Explosividad. En estos casos, si la concentración de gas es importante sería necesario asumir que la EMI es la del gas. Se recuerda que la EMI de la mayoría de gases y vapores de disolventes está entre 0,2 y 1 mJ. La EMI del hidrógeno, acetileno y disulfuro de carbono es inferior a 0,02 mJ. La experiencia práctica y la ausencia de incidencias, indican que las descargas en brocha son de poder de ignición bajo respecto a las nubes de polvo.

Tabla 2. Tipos de descarga electrostática y sus características

(continúa en la página siguiente)

TIPO DE DESCARGA	CARACTERÍSTICAS
DESCARGA EN HAZ O BROCHA PROPAGANTE	<ul style="list-style-type: none"> • Para este tipo de descarga es necesaria la existencia de una lámina de un material de resistividad y rigidez dieléctrica elevada con mucha carga electrostática en la superficie de ambas caras (densidad de carga superficial elevada) y de polaridad opuesta. • La lámina cargada bipolar puede estar en un espacio libre o más corrientemente tener una de las dos superficies en contacto con un material conductor (normalmente puesto a tierra). • La descarga se puede iniciar por un contacto eléctrico (cortocircuito) entre las dos superficies cargadas, por perforación de la lámina o exteriormente entre sus dos superficies. Presenta una imagen de descarga ramificada acompañada de un fuerte chasquido. • La energía liberada en estas descargas puede ser de 1 J o más. Estas descargas pueden provocar la ignición de atmósferas explosivas de polvos que circulen por el interior de conductos (particularmente materiales poliméricos de elevada resistividad) y con mayor motivo de atmósferas explosivas de gases y vapores. • Este tipo de descarga se puede presentar en operaciones en que se genera mucha carga, tales como en el transporte neumático de polvos de elevada resistividad a través de conducciones de material no conductor o conducciones metálicas con recubrimiento no conductor en su interior y en la pulverización electrostática de pintura en polvo. • En estos casos se generan niveles muy elevados de densidad de carga superficial sobre una lámina o capa no conductora especialmente si lleva exteriormente sobrepuesta una lámina metálica conectada a tierra. • Si la rigidez dieléctrica de la lámina o capa no conductora es suficiente para resistir la elevada intensidad de campo dentro de la misma, una densidad de carga superficial de valor $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ C/m}^2$ puede transformar la descarga en brocha a brocha propagante. Este caso se podría dar en un conducto o tramo de conducto aislante recubierto con una cinta o alambre helicoidal en la superficie externa dispuesto para servir como conexión equipotencial entre tramos de conducto metálico. • En casos especiales también puede generarse y acumularse carga electrostática de distinto signo en ambas caras de la lámina no conductora sin necesidad de la lámina metálica sobrepuesta.
DESCARGA EN RAYO	<ul style="list-style-type: none"> • Es un tipo de descarga que puede ocurrir dentro de nubes de polvo o desde nubes de polvo hacia tierra cuando la intensidad de campo debida a las cargas electrostáticas es muy elevada. No han sido observadas en nubes de polvo del tamaño que se encuentran en los procesos industriales. • Según investigaciones experimentales es improbable que ocurran en silos de volumen inferior a 60 m^3 o en silos de diámetro inferior a 3 m y de cualquier altura. Tales descargas son improbables en silos o recipientes de capacidades mayores, suponiendo que las intensidades de campo sean inferiores a 500 kV/m. • Las pruebas realizadas hasta ahora indican que excepto en atmósferas muy sensibles (de baja EMI) a la explosión, el riesgo de ignición debido a descargas desde la nube de polvo es muy bajo. • Para polvos con EMI inferior a 3 mJ podría ser necesaria una evaluación del riesgo.
DESCARGA EN CONO	<ul style="list-style-type: none"> • En la operación de descarga de polvo no conductor en el llenado de silos se puede acumular una densidad de carga electrostática muy importante en el montón depositado. Esto origina un campo eléctrico elevado en la cima del montón. • Se han observado grandes descargas desplazándose sobre la superficie de ese montón hacia las paredes del contenedor, en forma radial si son contenedores cilíndricos. • Este tipo de descarga puede causar la ignición de atmósferas explosivas de polvos sensibles a la ignición (de baja EMI) mientras están en suspensión en el aire con la necesaria concentración dentro del rango de explosividad. • La energía liberada en tales descargas depende del diámetro del silo y de la mediana del tamaño de partículas que forman el montón.

Tabla 2. Tipos de descarga electrostática y sus características

En las descargas en forma de chispa, la energía desprendida por la chispa entre un cuerpo conductor y otro conductor unido a tierra se calcula con la ecuación:

$$W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

- W = energía desprendida en julios (J)
- Q = cantidad de carga electrostática en el conductor que se descarga, en culombios (C)
- U = potencial al que está el conductor que se descarga, en voltios (V)
- C = capacidad eléctrica del cuerpo conductor que se descarga, en faradios (F)

En la Tabla 3 se presentan valores típicos de capacidades de elementos conductores usuales.

Un ejemplo de este cálculo se puede aplicar a un bidón metálico, situado sobre una superficie aislante, que se está llenando con polvo desde una trituradora, molino, tolva, etc. En bibliografía especializada se indica un valor aproximado de la corriente de carga procedente del polvo de 10^{-7} A . La resistencia R de fuga del bidón a tierra a causa de la superficie aislante la suponemos de $10^{11} \Omega$; y la capacidad C del bidón de unos 50 pF. El voltaje máximo que puede alcanzar el bidón es:

$$U_{\text{máx}} = I \cdot R = 10^{-7} \text{ A} \cdot 10^{11} \Omega = 10.000 \text{ V}$$

OBJETO	Capacidad pF (10 ⁻¹² F)
Tornillo	1
Brida (diámetro nominal 100 mm)	10
Artículos metálicos pequeños (pala, boquilla de manguera)	10 a 20
Contenedores pequeños (cubos, bidón de 50 L)	10 a 100
Contenedores medios (250 a 500 L)	50 a 300
Equipos de planta (reactores, grandes contenedores) rodeados de estructura puesta a tierra	100 a 1000
Cuerpo humano	100 a 300
Camión cisterna	1000

Tabla 3. Capacidad eléctrica de diferentes elementos conductores en picofaradios

y la energía máxima liberada en una descarga en chispa sería:

$$W_{\text{máx}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot 10.000^2 \text{ V}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ J} = 2,5 \text{ mJ}$$

El poder de ignición de las descargas en chispa se puede estimar comparando la energía desprendida, con la *Energía Mínima de Ignición* (EMI) del polvo procesado. Los valores de la EMI que se encuentran en la bibliografía corresponden a la mezcla que más fácilmente da lugar a la ignición (concentración óptima). Para los polvos combustibles varía desde valores inferiores a 1 mJ hasta otros por encima de 10 J.

A título de referencia se presenta, en la Tabla 4, valores de EMI de algunos polvos.

Las condiciones necesarias para que ocurra una *descarga en forma de brocha propagante* son:

- Densidad de carga superficial mayor que $2,5 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$.
- Espesor de la lámina aislante menor que 8 mm.
- Voltaje mínimo de perforación de 4 kV entre las dos caras de la lámina aislante.

La energía liberada en este tipo de descarga se puede estimar suponiendo que la lámina cargada (con polaridad de signos contrarios en sus dos caras), se comporta como un condensador plano paralelo con la lámina como dieléctrico. Por ejemplo, en una lámina de permitividad relativa $\epsilon = 2$, densidad de carga superficial $\sigma = 10^{-3} \text{ C/m}^2$, espesor $d = 75 \text{ }\mu\text{m}$, y área $A = 0,5 \text{ m}^2$, la energía almacenada W estaría calculada por:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = A \cdot d \cdot \sigma^2 / (2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0) = 0,5 \text{ m}^2 \cdot 75 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot (10^{-3} \text{ C/m}^2)^2 / (2 \cdot 2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/V m}) = 1,06 \text{ CV} \sim 1 \text{ J}$$

Si este valor se compara con la EMI de polvos se puede ver el poder de ignición de la descarga considerada.

Respecto las *descargas en forma de cono*, como referencia para silos con diámetros comprendidos entre 0,5 y 3 m y con polvo de tamaños entre 0,1 y 3 mm, la energía

liberada en este tipo de descargas, se puede estimar mediante la fórmula numérica:

$$W = 5,22 \cdot D^{3,36} \cdot d^{1,46}$$

W = límite superior de la energía de la descarga en cono (mJ)

D = diámetro del silo conductor conectado a tierra (m)

d = mediana de la distribución del tamaño de las partículas del polvo (mm)

Según se deduce de la fórmula anterior, las descargas en cono procedentes de polvo más grueso son de mucha mayor energía que las de polvo fino. Por tanto la situación más peligrosa se tiene cuando se manipulan gránulos (mayor generación de carga) junto a polvo fino (mayor facilidad de ignición) formando una nube con polvo de baja energía mínima de ignición. No hay riesgo de ignición si las partículas son sólo gránulos de tamaño mayor de $500 \text{ }\mu\text{m}$ (0,5 mm).

Según bibliografía especializada, este fenómeno sólo se ha observado en operaciones de llenado y vaciado con materias granulares poliméricas en silos y grandes contenedores. Las descargas desde el polvo depositado sólo se pueden esperar con polvo grueso de diámetros entre 1 y 10 mm.

En llenados de silos con gránulos de poliéster se ha observado un descenso súbito del campo eléctrico al tiempo de una señal de radiofrecuencia indicadora de que ha ocurrido una descarga. Existen aparatos que detectan las descargas electrostáticas.

El especialista Maurer indica que se necesitan mayores caudales de llenado (de hasta 28.000 kg/h) para generar descargas en partículas poliméricas de $800 \text{ }\mu\text{m}$ de diámetro (0,8 mm) que con partículas de mayor tamaño de unos 3 mm de diámetro. La resistividad del polvo también juega un papel esencial. Thorpe ha demostrado que el fenómeno no se ha observado cuando la resistividad del material a granel es inferior a $10^{10} \text{ }\Omega \cdot \text{m}$.

Producto	Tamaño partícula (μm) (Mediana de distribución de masa)	Energía mínima de ignición (mJ)
Almidón de maíz	< 10	20
Harina de trigo	No indicado	50
Harina de guisantes	25	100
Polvo de celulosa	27	10
Licopodio	30	5 a 15
Polvo de aluminio	< 20	< 1
Azufre	< 20	< 1
PVC	Fino	$\sim 10^6$
Polietileno	30	10
Polietileno	100	500
Melamina	< 10	10^5
Antraquinona	18	2 a 6
Poliacrilonitrilo	27	2 a 6

Tabla 4. Energía mínima de ignición de diferentes polvos