

RIESGOS DEBIDOS A LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA

DOCUMENTOS DIVULGATIVOS



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE EMPLEO
Y SEGURIDAD SOCIAL



INSTITUTO NACIONAL
DE SEGURIDAD E HIGIENE
EN EL TRABAJO

Título:

Riesgos debidos a la electricidad estática

Autor:

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo

Elaborado por:

Cantalejo García, Marcos

Herradón García, M^a Ángeles

López Riera, Sara

Sánchez Fuentes, María

Centro Nacional de Nuevas Tecnologías (INSHT)

Bestratén Belloví, Manuel

Centro Nacional de Condiciones de Trabajo (INSHT)

Sanz Pereda, José Jorge

Centro Nacional de Verificación de Maquinaria (INSHT)

Edita:

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)

C/ Torrelaguna, 73 - 28027 Madrid

Tel. 91 363 41 00, fax 91 363 43 27

www.insht.es

Composición:

Servicio de Ediciones y Publicaciones del INSHT

Edición:

Madrid, octubre 2015

NIPO (en línea): 272-15-036-2

Hipervínculos:

El INSHT no es responsable ni garantiza la exactitud de la información en los sitios web que no son de su propiedad. Asimismo la inclusión de un hipervínculo no implica aprobación por parte del INSHT del sitio web, del propietario del mismo o de cualquier contenido específico al que aquel redirija

Catálogo general de publicaciones oficiales:

<http://publicacionesoficiales.boe.es>

Catálogo de publicaciones del INSHT:

<http://www.insht.es/catalogopublicaciones/>



**RIESGOS
DEBIDOS A LA
ELECTRICIDAD ESTÁTICA**

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	7
2. EL FENÓMENO ELECTROSTÁTICO	7
3. GENERACIÓN, ACUMULACIÓN Y DISIPACIÓN. ACTIVIDADES Y PROCESOS AFECTADOS	21
4. RIESGOS Y DAÑOS PARA LA SALUD ASOCIADOS A LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA	27
5. NORMATIVA APLICABLE	39
6. EVALUACIÓN DEL RIESGO	50
7. MEDIDAS PREVENTIVAS Y DE PROTECCIÓN.....	51
8. APLICACIONES PRÁCTICAS.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	88
GLOSARIO DE TÉRMINOS	94

PRÓLOGO

El fenómeno de la electricidad estática se puede presentar en todo lugar o situación y puede verse involucrado cualquier material, con independencia de su estado de agregación (sólido, líquido o gaseoso), ya que su generación está ligada íntimamente a la estructura atómica de la materia. Los efectos más evidentes de la presencia de cargas eléctricas estáticas se producen cuando dichas cargas están acumuladas en un material y se disipan en forma de chispa hacia otro material descargado o con un nivel de carga diferente; por ejemplo, cuando le damos la mano a alguien; o cuando se eriza el vello en las cercanías de un material cargado; o cuando se produce un atasco en una línea de producción de papel porque el producto se ha adherido sobre sí mismo o a otros materiales. Desafortunadamente, existen situaciones que pueden ser más peligrosas que las indicadas aunque, a priori, algunas de ellas no lo parezcan. La circulación de un fluido combustible a alta velocidad por el interior de una tubería; el llenado de un silo con materiales en forma de grano, polvo, fibra o mezclas de estos; la pintura de piezas con pistola a presión; estos son solamente algunos ejemplos de procesos o situaciones en los que se pueden generar y acumular grandes cantidades de cargas eléctricas que, en el momento de su disipación, pueden ser focos potenciales de ignición y, por tanto, constituir un riesgo laboral grave.

El presente documento recoge los principales riesgos laborales que están relacionados con la presencia de cargas electrostáticas en el lugar de trabajo y su manifestación en forma de descargas. La combinación chispa + atmósfera explosiva puede tener consecuencias graves, ya que en las condiciones físicas adecuadas pueden provocar una explosión con una potencialidad lesiva muy elevada.

En este documento también se aborda el fenómeno electrostático atmosférico; toda actividad industrial con riesgo de formación de atmósferas explosivas deberá disponer de un sistema de protección eficaz frente a las descargas atmosféricas para minimizar las consecuencias que éstas puedan tener en el caso de manifestarse sobre el edificio.

En la actualidad se están estudiando los riesgos derivados de la fabricación y manipulación de nanomateriales; las propiedades de estos materiales pueden ser muy diferentes y poco comparables con las de los mismos materiales en forma particulada convencional; no obstante, si un material en forma de polvo es capaz de arder, su versión en forma de nanomaterial generalmente también es susceptible de arder, por lo que no se debe ignorar.

A continuación, el documento recoge una relación no exhaustiva de normativa legal y técnica en la que el riesgo electrostático es tenido en cuenta. Muchos de los riesgos relacionados con este fenómeno pueden controlarse eficazmente si se aplican

las medidas recogidas en los reglamentos, así como en las Guías Técnicas que los explican y desarrollan y en la diversa documentación técnica que existe al respecto.

Finalmente, se describen las soluciones preventivas generales que se pueden adoptar para controlar el riesgo de ignición debido a descargas electrostáticas, así como algunos ejemplos prácticos de aplicación de dichas medidas.

1. INTRODUCCIÓN

Todos los materiales están constituidos por átomos, los cuales están formados a su vez por partículas más pequeñas; las principales partículas subatómicas son los *protones*, los *neutrones* y los *electrones*. Una forma simplificada de representar un átomo sería un núcleo, formado por *protones* y *neutrones*, con carga eléctrica neta positiva, y los *electrones*, de carga eléctrica negativa, moviéndose alrededor del núcleo (véase la figura 1). Una de las principales características de la carga eléctrica es que, en cualquier proceso físico, la carga total de un sistema aislado siempre se conserva, es decir, la suma aritmética de las cargas positivas y negativas no varía en el tiempo. Por razones históricas (véase el **capítulo 2** de este documento), a los *electrones* se les asignó carga negativa (-1 o $-e$) y a los *protones* carga positiva ($+1$ o $+e$).

En determinadas circunstancias, los *electrones* más externos de un átomo pueden saltar a otro; el átomo que pierde *electrones* queda cargado positivamente mientras que el que los gana queda cargado negativamente. Este movimiento de *electrones* se puede conseguir por fricción o rozamiento entre dos materiales de diferente naturaleza: uno de ellos cederá *electrones* y el otro los ganará, generándose una carga estática neta en cada uno de los materiales.

La acumulación de carga estática puede dar lugar a una descarga cuando el objeto cargado se pone en contacto con otro: es lo que ocurre cuando una persona que presenta una cierta acumulación de carga estática toca el pomo metálico de una puerta y experimenta un pequeño y súbito cosquilleo.

Dos objetos que estén cargados con cargas de signo opuesto se atraen, mientras que si presentan cargas del mismo signo se repelen.

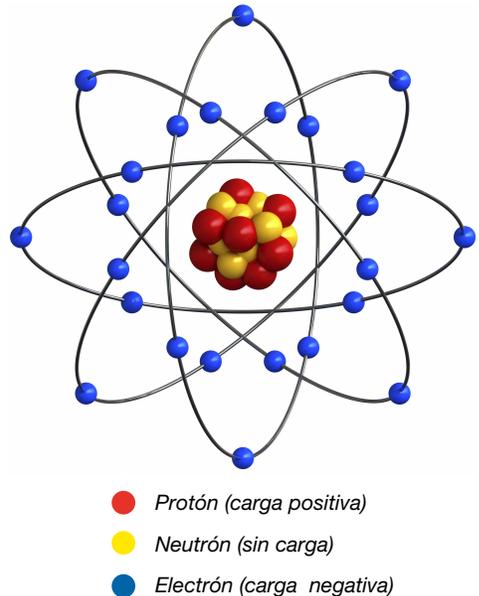


Figura 1. Modelo atómico de Rutherford

2. EL FENÓMENO ELECTROSTÁTICO

Desde la Antigüedad se tiene constancia de la existencia de las cargas eléctricas y de los fenómenos eléctrico y magnético asociados a estas: Tales de Mileto (siglo

VI a. C.) observó que, después de frotar una barra de ámbar con un paño, la barra atraía objetos ligeros; Theophrastus (siglo III a.C.) afirmó que este fenómeno se producía en muchos otros materiales. En el siglo XVII William Gilbert recogió en su libro “De Magnete” el primer trabajo sistemático sobre fenómenos eléctricos y magnéticos; de hecho él fue quien utilizó por primera vez el término “electricidad” (del griego elektron, que significa ámbar). Además, clasificó los materiales en eléctricos (conductores) y aneléctricos (aislantes) e ideó el primer electroscopio.

El trabajo de Gilbert tuvo continuación con Otto Von Guericke (quien diseñó la primera máquina electrostática y predijo la naturaleza eléctrica de los relámpagos); Stephen Gray (quien demostró que los materiales conductores pueden ser electrizados si están aislados y transmitió electricidad a través de ellos); Charles François de Cisternay du Fay (quien fue el primero en identificar la existencia de dos tipos de carga eléctrica: positiva y negativa, que él denominó carga “vítrea” y carga “resinosa”); Pieter Van Musschenbroek (quien descubrió la botella de Leyden y la base de los actuales condensadores eléctricos); William Watson (quien demostró que una descarga de electricidad estática es una corriente eléctrica); y Benjamin Franklin (quien demostró que los rayos eran descargas eléctricas de tipo electrostático e inventó el pararrayos).

En definitiva: a través de la Historia se ha demostrado que la generación de cargas eléctricas es un fenómeno natural asociado íntimamente a la estructura atómica de la materia, por lo que se puede producir en cualquier material. Sin embargo, no se deben confundir las cargas dinámicas (o corriente eléctrica) con las cargas electrostáticas (que no se mueven). Las primeras se mueven debido a que existe una diferencia de potencial eléctrico mantenido en el tiempo entre dos puntos de un material continuo o de varios materiales puestos en contacto entre sí; estas cargas no son objeto del presente documento. Las segundas normalmente se producen cuando entran en contacto o en proximidad dos materiales cualesquiera, inicialmente neutros, ya sea en estado líquido, sólido o gaseoso; debido a la interacción entre ellos, intercambian cargas y estas quedan retenidas en los materiales hasta que se da una situación que les permite recombinarse (o dispersarse).

Ejemplos:

- Fricción entre materiales sólidos: procesos en continuo, limpieza de efluentes, etc.
- Fragmentación de materiales sólidos de estructura heterogénea: molienda, circulación y transporte de material en forma de grano, etc.
- Fricción entre materiales líquidos y sólidos: circulación y trasvase de líquidos en tuberías y depósitos, etc.
- Fricción entre materiales líquidos y gases: gasificación de líquidos, etc.
- Inducción de carga en un material por proximidad con otro ya cargado: circulación de personas junto a cintas transportadoras fuertemente cargadas, etc.

Como ya se ha indicado, los átomos están formados principalmente por *protones* y *neutrones*, que a su vez componen el núcleo, y por *electrones* que orbitan alrededor de este. Los *electrones* más internos están fuertemente unidos al núcleo, de carga opuesta, pero los más externos están más débilmente unidos y pueden desprenderse con más facilidad. La fuerza que retiene a los *electrones* exteriores varía de una sustancia a otra. Por ejemplo, los *electrones* son retenidos con mayor fuerza en el material plástico del que está fabricada la cubierta de un bolígrafo que

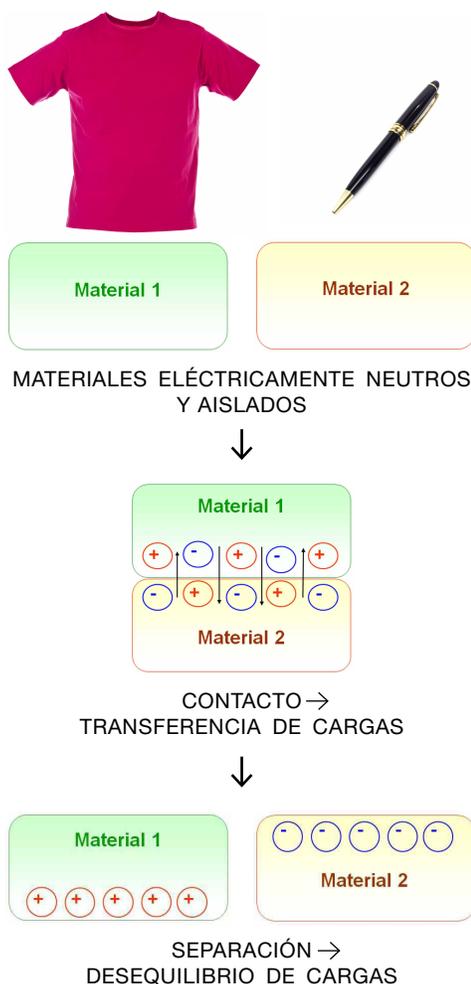


Figura 2. Generación y acumulación de cargas eléctricas entre dos materiales diferentes

en el algodón de unos pantalones (véase la figura 2); de modo que, si se frota el bolígrafo contra los pantalones, se transferirán *electrones* del pantalón al bolígrafo. Así, el bolígrafo quedará con un exceso de *electrones* y, por tanto, se cargará negativamente. A su vez, los pantalones quedarán con una deficiencia de *electrones* y adquirirán una carga positiva. Los átomos con deficiencia de *electrones* se denominan *iones* positivos porque, al perder *electrones*, su carga neta resulta positiva.

Además, la tendencia de los materiales a la cesión o adquisición de *electrones* varía en magnitud según el material de que se trate. Por ejemplo, el nylon tiene una mayor tendencia que el algodón a la cesión de *electrones*; por tanto, la interacción entre una prenda de nylon y un bolígrafo dará como resultado la generación de un mayor desequilibrio de cargas eléctricas en los materiales que en el caso del algodón. Este comportamiento es importante para el tratamiento de la problemática electrostática, por lo que ha sido estudiado con cierta profundidad; uno de los resultados está recogido en la **serie triboeléctrica**, que es una lista de materiales ordenados en función de su tendencia para la cesión o adquisición de *electrones* (véase la figura 3).

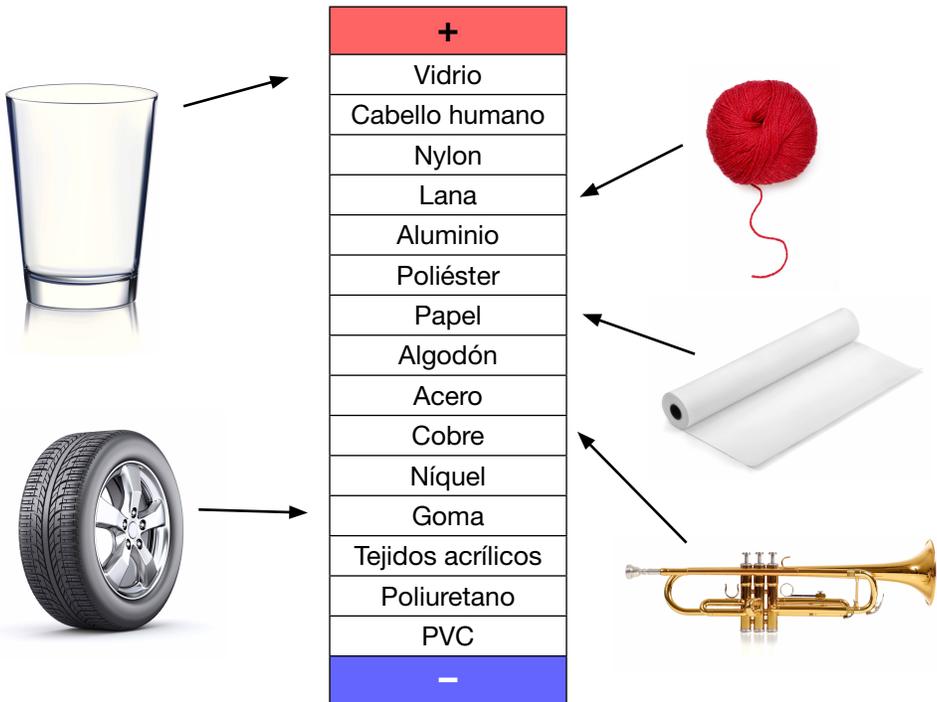


Figura 3. Serie triboeléctrica¹

Frotando dos materiales de la serie, el que esté en una posición más alta se cargará positivamente, mientras que el que se sitúe más abajo se cargará negativamente. Además, cuanto más separados estén los materiales en la serie, mayor será la generación de cargas eléctricas y, por tanto, podrán quedar con más carga acumulada.

La serie triboeléctrica tiene un carácter meramente cualitativo, es decir, simplemente da una idea de cómo se van a comportar los materiales; la cantidad real de carga producida depende principalmente de la velocidad de fricción y/o separación de los materiales y de su *resistividad eléctrica*.

La tasa de generación de cargas electrostáticas también depende de otros factores, como por ejemplo:

- El **estado** de las superficies en contacto (oxidación, suciedad, rugosidad, etc.): cuanto mayor sea el deterioro o la rugosidad de las superficies en contacto, mayor será el rozamiento producido y, por tanto, la generación de cargas aumentará.

¹ NTP 567. Protección frente a cargas electrostáticas. INSHT, 2000.

- El **área** común entre las dos superficies: este factor determina de forma proporcional directa la tasa de generación de cargas.
- La **temperatura** de los materiales: este parámetro está íntimamente ligado a la actividad atómica, de modo que cuanto mayor sea la temperatura de los materiales, menos energía se precisará para que salten los *electrones* entre sus átomos.

La electricidad estática representa un **desequilibrio** en la repartición de las cargas por transferencia de *electrones* entre dos materiales que han interactuado, creándose una perturbación en el espacio que rodea a dichas cargas que se llama *campo eléctrico* (véase la figura 4) y, por tanto, una **diferencia de potencial** entre ellas. Los materiales están formados por millones de átomos, por tanto se debe llevar este fenómeno a un nivel macroscópico; así, para el caso particular de dos materiales sólidos aislantes o aislados, sus superficies de contacto se pueden asemejar a dos placas paralelas de longitud infinita que crean un *campo eléctrico* entre ellas (véase la figura 5).

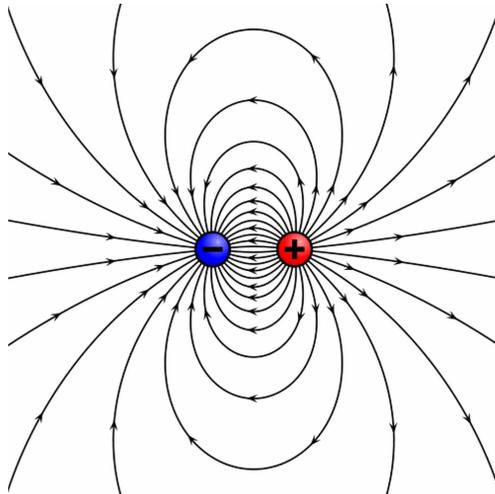


Figura 4. Líneas del campo eléctrico creado por dos cargas opuestas separadas por una distancia finita (dipolo)²

Dos cuerpos conductores separados por un *material aislante* o incluso por el aire pueden quedar cargados, uno con una carga positiva y otro con otra carga igual pero negativa; así se constituye lo que se denomina **condensador eléctrico**. Dado que en la naturaleza todo tiende al equilibrio, al establecer una vía suficientemente conductora entre los dos cuerpos, se libera la energía almacenada descargándose y produciendo posiblemente una **chispa** o descarga disruptiva. Es esta recombinación brusca de las cargas separadas la que constituye el **riesgo** y su estudio es el principal objeto de este documento.

² Autor: <http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Geek3>

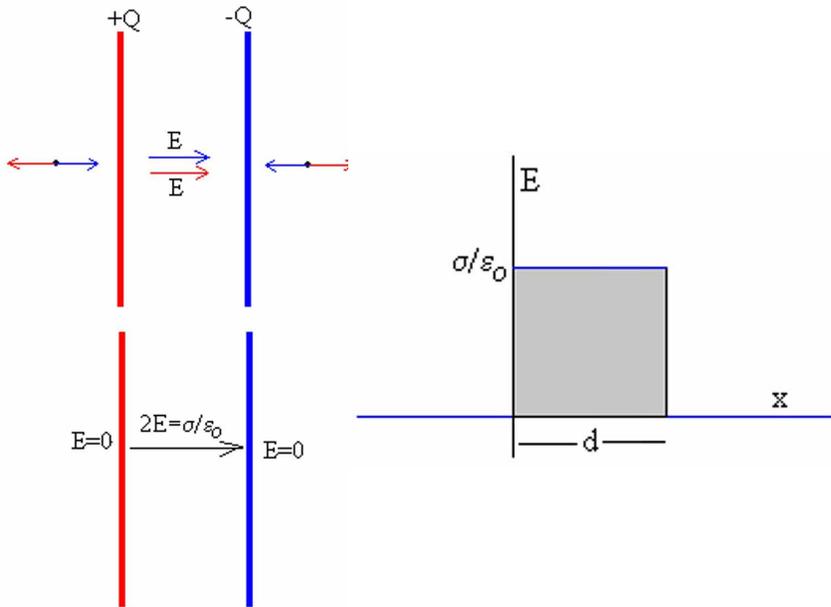


Figura 5. Campo eléctrico creado por dos placas paralelas infinitas separadas por una distancia d finita³

El parámetro que determina la peligrosidad de una chispa es la **cantidad de energía liberada** cuando esta tiene lugar, que se manifiesta en forma de radiaciones ópticas, ionización y **calor**; este último factor es generalmente el desencadenante de la combustión: cuando las chispas se producen en una **atmósfera inflamable de gases y/o vapores**, es relativamente fácil que se inicie el incendio, porque la energía liberada suele ser superior a la **energía mínima de inflamación** (EMI) o **energía de activación** (e_A) de la mezcla gas/vapor + aire. De este modo, los gases o vapores se clasifican en 4 grupos: I, II A, II B y II C⁴ (véanse las tablas 1 y 2). Se puede presumir la posibilidad de una inflamación efectiva si la chispa se genera debido a una diferencia de potencial superior a 1.000 V⁵.

Cuando las chispas se producen en una **atmósfera inflamable de polvo**, la probabilidad de que se inicie la ignición suele ser más baja porque, por lo general, la **energía mínima de inflamación** de la mezcla es más elevada que en el caso de los gases y/o vapores, del orden de 1 a 1000 mJ (véase la tabla 3), de

³ Autor: Ángel Franco García. Dpto. Física Aplicada I. Universidad del País Vasco. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial, Éibar (Guipúzcoa).

⁴ Los gases del grupo I corresponden a minería (más restrictivo) y los de los grupos II a la industria de superficie (véase la norma EN60079-20).

⁵ NTP-225: Electricidad estática en el trasvase de líquidos inflamables.

modo que la mayoría de las descargas electrostáticas no son capaces de iniciar la ignición.

Tabla 1

Clasificación de las sustancias en función de su energía mínima de inflamación⁶

Grupo	e_A (μJ)	Ejemplo
I	> 280	Grisú
IIA	> 250	Acetona
IIB	96 – 250	Metanol
IIC	< 96	Hidrógeno
IIIA (Polvo combustible)	20000 – 30000	Almidón de maíz ($<10 \mu\text{m}$)
IIIB (Polvo no conductor)	10000	Polipropileno ($30 \mu\text{m}$)
IIIC (Polvo conductor)	< 1000 – 50000	Aluminio ($<20 / 29 \mu\text{m}$)

Tabla 2

Energía mínima de inflamación de algunas sustancias combustibles en forma de gas o vapor (grupo II)⁷

Ejemplos de sustancias en forma de gas o vapor (Grupo II)			
Grupo IIC		Grupo IIA	
Sustancia	e_A (mJ)	Sustancia	e_A (mJ)
Disulfuro de carbono	0,009	Ciclohexano	0,220
Hidrógeno	0,011	n-heptano	0,240
Acetileno	0,017	Propano	0,250
Grupo IIB		Metano	0,290
Sustancia	e_A (mJ)	Alcohol isopropílico	0,650
Etileno	$\geq 0,060$	Acetona	1,150
Metanol	0,140	Isooctano	1,350
Ciclopropano	0,180	Acetato de etilo	1,420

⁶ Norma UNE-EN 60079-0:2013. Atmósferas explosivas. Parte 0: Equipo. Requisitos generales. Norma UNE-EN 60079-11:2007. Atmósferas explosivas. Parte 11: Protección del equipo por seguridad intrínseca "i" (IEC 60079-11:2006).

⁷ NTP 374: Electricidad estática: carga y descarga de camiones cisterna (I). INSHT, 1995.

Tabla 3

Energía mínima de inflamación de algunas sustancias combustibles en forma de polvo (grupo III)⁸

Ejemplos de sustancias en forma de polvo (Grupo III)			
Sustancia	e_A (mJ)	Sustancia	e_A (mJ)
Fructosa (150 µm) (*)	<1	Leña (70 µm)	20
Aluminio (<20 / 29 µm)	<1 / 50	Almidón de maíz (<10 µm)	20 - 30
Azufre (<20 / 180 µm)	<1 / > 100	Arroz en polvo (35 µm)	30
Poliacrilonitrilo (27 µm)	2 - 6	Cacao en polvo (34 µm)	30
Dextrina (<20 µm)	8 - 14	Corcho (82 µm)	35
Resina epoxi (32 µm)	9	Coque (15 µm)	80
Glucosa (30 µm)	10	Urea (13 µm)	80
Café (29 µm)	10	Piensos (26 µm)	<100
Celulosa (27 µm)	10	Dextrosa (80 µm)	100
Azúcar (12-32 µm)	10	Fécula de patata (<35 µm)	100
Pesticidas (<10 µm)	10	Cinc (<20 µm)	100
Resina fenólica (<10 µm)	10	Suero de leche (<105 µm)	>100
Harinas de cereales (70 µm)	10 - 100	Trigo (90 µm)	>100
Polietileno (30 / 100 µm)	10 / 500	Magnesio (28 µm)	120
Pimienta (120 µm)	>10	Bronce (34 µm)	300
Pimentón (97 µm)	>10	Salvado (600 µm)	1000
Malta (82 µm)	>10	PVC (<10 µm)	>1000
Glútenes (50-150 µm)	>10	Melamina (<10 µm)	10000
Lactosa (10 / 120 µm)	>10 / >1000	Tabaco (<125 µm)	>10000

(*) Entre paréntesis: granulometría media.

⁸ Guía al mundo EX. Cómo utilizar los aparatos eléctricos en zonas con riesgo de explosión. CORTEM Group, 2013.

Prevención y protección de explosiones de polvo en instalaciones industriales. de Gea Rodríguez, X. FREMAP, 2007.

NTP 827. Electricidad estática en polvos combustibles (I): características de las descargas electrostáticas. INSHT, 2010.

El fenómeno de la ignición de atmósferas explosivas debe combinarse con la efectiva presencia y **concentración** de la sustancia combustible en el aire; para ello, se han definido los **límites de explosividad**:

- *Límite Inferior de Explosividad (LIE)*: es la concentración mínima de sustancia en el aire por debajo de la cual una explosión no es posible.
- *Límite Superior de Explosividad (LSE)*: es la máxima concentración de sustancia en el aire por encima de la cual una explosión no es posible.

De forma intuitiva, se puede decir que por debajo del *LIE* la mezcla es “demasiado pobre” para arder (pues hay poco combustible) y por encima del *LSE* es “demasiado rica” para arder (ya que hay poco oxígeno). Los límites de explosividad delimitan el denominado “**rango explosivo**” (véase la figura 6a).

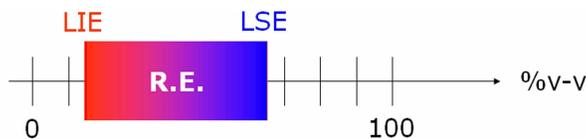
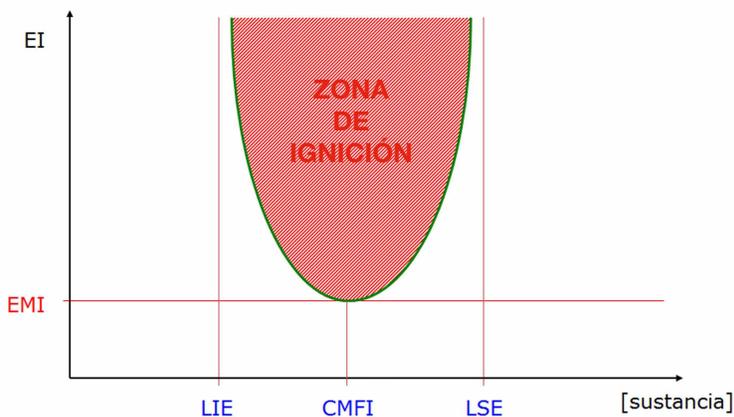


Figura 6a. Rango explosivo de una sustancia inflamable

Por otra parte, dentro del *rango explosivo* no todas las concentraciones tienen la misma **susceptibilidad a la ignición** para una energía determinada; así, se define la **concentración más fácilmente inflamable (CMFI)** como aquella concentración de la mezcla que la hace más susceptible de arder en presencia de una descarga electrostática (véase la figura 6b). La CMFI suele aproximarse al punto medio entre el *LIE* y el *LSE* y es la que determina la **energía mínima de inflamación (EMI)** de la mezcla.



donde: $CMFI [\%] = \text{concentración más fácilmente inflamable}$

Figura 6b. Energía de inflamación efectiva necesaria para la ignición de una nube formada por una sustancia inflamable en función de su concentración en el aire

La tabla 4 recoge, a título informativo, los límites de explosividad y otras características fisicoquímicas relevantes de algunas *sustancias inflamables*.

Tabla 4
Propiedades fisicoquímicas de algunas sustancias *inflamables* y *combustibles*

Sustancia	Densidad relativa ⁽¹⁾	Temperatura de autoignición (°C) ⁽²⁾	LIE ⁽³⁾	LSE ⁽³⁾	Punto de inflamación o de destello (°C) ⁽⁴⁾
Acetaldehído	1,5 (vapor)	185	4	60	-38
Acetato de etilo	3 (vapor)	427	2,2	11,5	7
Acetileno	0,907 (gas)	305	2,5	80	-
Acetona	2 (vapor)	465	2,2	13	-18
Ácido acético	3,5 (vapor)	316	2,7	10,3	49
Ácido cianhídrico (cianuro de hidrógeno)	0,94 (vapor)	538	5,6	40	-18
Aluminio (polvo)	-	590	-	-	-
Amoniaco	0,59 (vapor)	651	15	28	-
Benceno	2,7 (vapor)	498	1,2	8	-11
Butano	1,5 – 2 (gas)	365	1,9	8,5	-
Canela (polvo)	-	480	0,06	-	-
Carbón activo (polvo)	-	540	0,03	-	-
Carbón vegetal (polvo)	-	520	0,06	-	-
Clorobenceno	3,88 (vapor)	590	1,3	11	27

Sustancia	Densidad relativa ⁽¹⁾	Temperatura de autoignición (°C) ⁽²⁾	LIE ⁽³⁾	LSE ⁽³⁾	Punto de inflamación o de destello (°C) ⁽⁴⁾
Disulfuro de carbono	2,63 (vapor)	90	1	50	-30
Etano	1,05 (gas)	472	3	12,5	-
Etanol	1,6 (vapor)	363	3,3	19	13
Etileno	0,98 (gas)	490	2,7	36	-
Fuelóleo marino	> 5 (vapor)	220-300	0,5	5	≥ 62
Gas natural ⁽⁵⁾	0,61 (gas)	583	4,7	13,7	-
Gasóleo A	3,4 (vapor)	> 250	6	13,5	> 55
Gasóleo B	3,4 (vapor)	257	1,3	6	≥ 60
Gasóleo C	> 5 (vapor)	> 220	1	6	> 60
Gasolina sin plomo 95 / 98	3 (vapor)	> 200	0,8	5	- 46
Hexano	3 (vapor)	225	1,1	7,5	-22
Hidrógeno	0,0695 (gas)	560	4	75	-
Magnesio (polvo)	-	473	0,03	-	-
Metano	0,6 (gas)	537	5	15	-
Metanol	1,1 (vapor)	464	5,5	44	12
Monóxido de carbono	0,97 (gas)	605	12,5	74	-
Naftaleno ⁽⁶⁾	4,42 (vapor)	540	0,9	5,9	80
Pentanol	3 (vapor)	320	1,2	10,5	43

Sustancia	Densidad relativa ⁽¹⁾	Temperatura de autoignición (°C) ⁽²⁾	LIE ⁽³⁾	LSE ⁽³⁾	Punto de inflamación o de destello (°C) ⁽⁴⁾
Propano	1,5 (gas)	432	2,2	9,5	-
Queroseno	4,5 (vapor)	220	0,6	8	35 - 63
Tolueno	3,1 (vapor)	480	1,1	7,1	4

- (1) Las densidades indicadas son cocientes entre las densidades absolutas de las sustancias en forma de gas o vapor y la densidad absoluta del aire en Condiciones Normales (0°C y 1 atm = 760 mmHg = 1,013 bar).
- (2) La temperatura de autoignición para polvos es la TIN (en nube).
- (3) El LIE y el LSE se miden en % en volumen (m^3/m^3) para gases y vapores y en kg/m^3 para polvos.
- (4) Punto de inflamación o de destello: temperatura de un líquido en Condiciones Normales a partir de la cual este desprende suficientes vapores para alcanzar el LIE.
- (5) Gas natural: mezcla de metano (88%), etano (9%), propano (3%) y aditivos.
- (6) Sólido que sublima lentamente a vapor a temperatura ambiente.

Carga electrostática del cuerpo humano

Un *condensador eléctrico* es un dispositivo pasivo capaz de almacenar energía sustentando un *campo eléctrico*. Está formado por dos superficies conductoras, generalmente en forma de láminas o placas, en situación de influencia total, es decir, que todas las líneas de *campo eléctrico* que parten de una van a parar a la otra (véase la figura 5) y están separadas eléctricamente por un *material aislante dieléctrico* (véase la figura 7). Las placas, sometidas a una diferencia de potencial, adquieren una determinada carga eléctrica, positiva en una de ellas y negativa en la otra, siendo nula la variación de carga total. Esta carga eléctrica adquirida y retenida por las placas del condensador constituye un almacén de energía eléctrica; cuando un condensador cuyas placas están cargadas se introduce en un circuito eléctrico, le cederá esa energía acumulada (véase la figura 8).

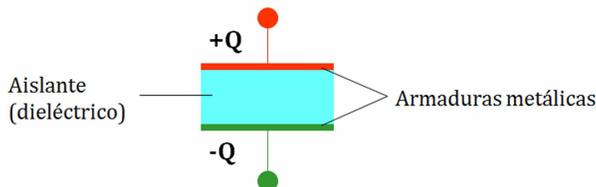


Figura 7. Esquema de un condensador elemental de placas paralelas

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} QV$$

donde: E [julios, J] = Energía acumulada
 Q [culombios, C] = carga eléctrica acumulada
 C [faradios, F] = capacidad del condensador
 V [voltios, V] = diferencia de potencial a la que es sometido el condensador

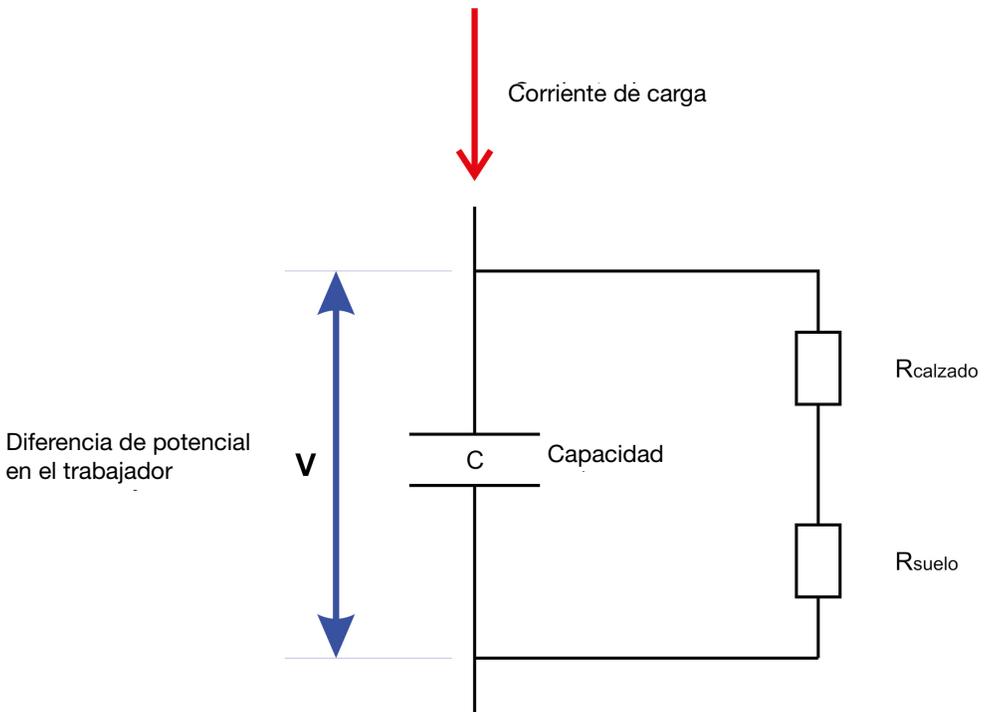
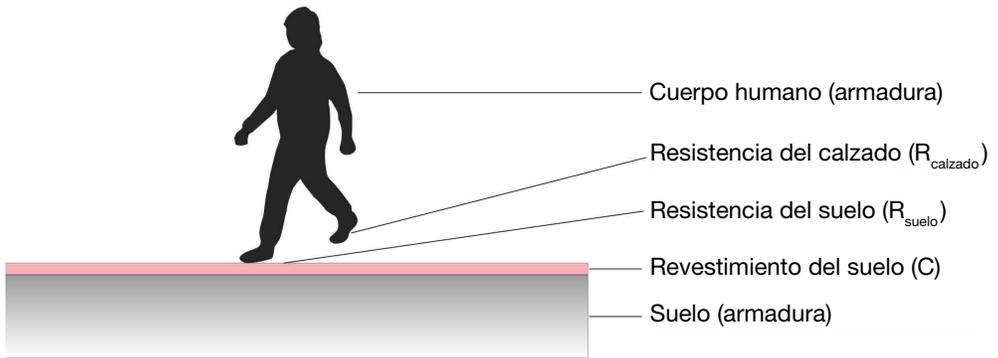
Figura 8. Energía acumulada por un condensador eléctrico

El cuerpo humano no es tan buen conductor como los materiales que se utilizan habitualmente en los sistemas de conducción eléctrica, pero, al tener una alta proporción de agua con sales disueltas, se considera que conduce relativamente bien la corriente eléctrica, en especial a los efectos del comportamiento de las cargas electrostáticas.

La acumulación de cargas en las personas depende de diversos factores:

- a. Su movimiento en el entorno.
- b. Su contacto con cuerpos susceptibles de cargarse o la proximidad de *campos eléctricos* generados por cuerpos cargados (por inducción).
- c. Sus características físicas (estado de humedad de la piel, sudoración, etc.).
- d. La humedad ambiental: con una *humedad relativa* (H.R.) baja, el cuerpo humano puede acumular cargas que generen un campo electrostático de varios kV.
- e. La conductividad de la vestimenta: la ropa de fibras sintéticas y los guantes o calzado aislantes (goma, plástico) favorecen la acumulación de cargas.
- f. El tipo de suelo o pavimento (*conductividad*).

Una persona, al caminar sobre un pavimento no conductor con calzado de suela no conductora (goma, plástico, etc.), puede alcanzar un potencial de unos 10.000 V. La capacidad del cuerpo humano actuando como **condensador** eléctrico es de unos 200 pF (200×10^{-12} F); por tanto, aplicando el principio recogido en la figura 9, el cuerpo humano será capaz de acumular una energía electrostática de unos **10 mJ** o incluso superior, más que suficiente para provocar la ignición de muchas sustancias que forman *atmósferas explosivas*, en especial aquellas cuya EMI es inferior a 30 mJ (véanse la figura 9 y la tabla 3).



$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} 200 \times 10^{-12} (104)^2 = 0,01 \text{ J} = 10 \text{ mJ}$$

Figura 9. Carga electrostática del cuerpo humano. Energía que puede acumular una persona al caminar⁹

⁹ NTP 887. Calzado y ropa de protección “antiestáticos”. INSHT, 2010.

Tabla 5
Potencial electrostático acumulado en algunos procesos

PROCESO	POTENCIAL ACUMULADO (V)		ENERGÍA ACUMULADA (teórica) (mJ)	
	H.R.=10-20%	H.R.=65-90%	H.R.=10-20%	H.R.=65-90%
Persona andando sobre moqueta	35.000	1.500	122,50	0,23
Manipular bolsas de polietileno	20.000	1.200	40	0,14
Utilización de silla de trabajo barnizada	18.000	1.500	32,40	0,23
Caminar sobre suelo de PVC	12.000	250	14,40	0,0063
Realizar tareas comunes en banco de trabajo	6.000	100	3,60	0,001
Separar láminas de plástico	800	600	0,064	0,036

Es necesario aclarar que, en la mayoría de los casos, una descarga electrostática de esta magnitud no es capaz, por sí sola, de producir daño a la persona, ya que la cantidad de energía puesta en juego es tan pequeña que el riesgo de electrocución o de quemaduras en la piel es muy bajo. Lo que constituye el riesgo es la coincidencia en el espacio y en el tiempo de una descarga electrostática y de una *atmósfera explosiva*. En el capítulo 4 de este documento se describen con detalle los efectos derivados de las descargas electrostáticas.

3. GENERACIÓN, ACUMULACIÓN Y DISIPACIÓN. ACTIVIDADES Y PROCESOS AFECTADOS

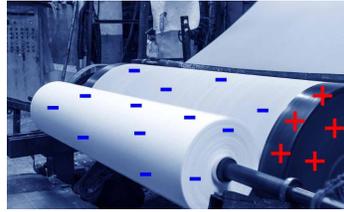
Generación

La generación de cargas electrostáticas se puede producir por conducción (contacto o fricción) o bien por inducción (influencia). A continuación se recogen los procesos en los que se genera mayor cantidad de carga electrostática, así como las actividades o industrias en las que se pueden desarrollar dichos procesos (véanse las figuras 10 y 11).

a. PROCESADO Y TRANSPORTE DE SÓLIDOS

(especialmente mediante rodillos, tornillos sinfín o neumáticamente; molienda, micronización, laminación, etc.)

(característico de industria textil, papelera, alimentaria, cementera, siderúrgica, de plásticos, etc.)



b. TRANSPORTE Y TRASVASE DE LÍQUIDOS NO CONDUCTORES

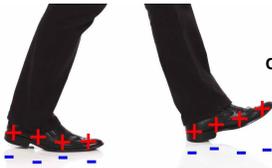
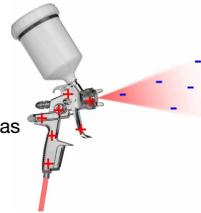
(especialmente disolventes orgánicos y al paso de puntos o procesos singulares: filtrado, tamizado, mezclado, agitación, etc.; y también con partículas no miscibles)

(característico de industria química, petroquímica, de pinturas, etc.)

c. FLUJO DE GASES POR BOQUILLAS Y/O CONTRA OBJETOS CONDUCTORES

(especialmente si están contaminados con óxidos o partículas líquidas o sólidas)

(característico de cabinas de pintura, industrias de fabricación de piezas metálicas, etc.)

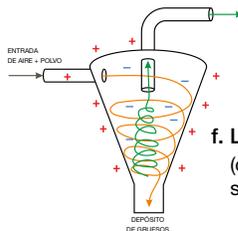
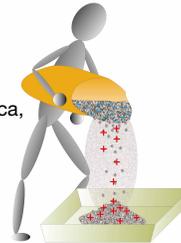


d. DESPLAZAMIENTO DE PERSONAS O EQUIPOS DE TRABAJO SOBRE SUPERFICIES AISLANTES

(por ejemplo, caminar con calzado de goma sobre suelos sintéticos,manutención mecánica sobre suelos aislantes, etc.)

e. TRANSPORTE, TRASVASE Y ALMACENAMIENTO DE MATERIALES EN FORMA DE POLVOS Y FIBRAS
(especialmente mediante vertido libre)

(característico de industrias de fabricación de piensos, farmacéutica, almidón, polvos metálicos, etc.)



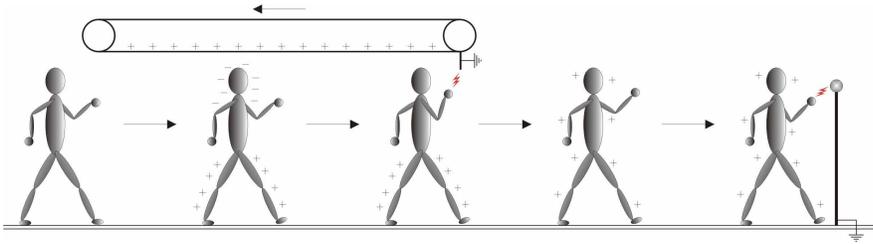
f. LIMPIEZA DE EFLUENTES GASEOSOS

(característico de industria química, petroquímica, siderometalúrgica, de reciclado, etc.)

Figura 10. Generación de cargas electrostáticas adquiridas por conducción¹⁰

¹⁰ Guía de buenas prácticas para la aplicación 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 de la Directiva 1999/92/CE. Comisión Europea 2005.

1er ejemplo: cuando un trabajador pasa junto a una cinta transportadora previamente cargada, por proximidad al campo electrostático generado por esta las cargas de su cuerpo se recombinan, de modo que, si durante este proceso el trabajador se pone a tierra, al abandonar la influencia de la cinta, quedará cargado. Esta carga neta se podrá disipar en forma de chispa cuando el trabajador toque cualquier elemento que esté puesto a tierra.



2º ejemplo: durante el transporte de fluidos por el interior de tuberías, debido a la constante fricción se generan cargas electrostáticas en ambos materiales; si existen otros materiales próximos a esta tubería (por ejemplo, otras canalizaciones), por influencia del campo electrostático de la primera también podrán quedar cargados. Este fenómeno debe controlarse especialmente en el caso de transporte de fluidos *inflamables* (carburantes gaseosos y líquidos) o combustibles (*polvos*).

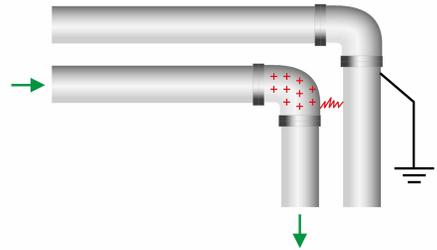


Figura 11. Generación de cargas electrostáticas adquiridas por inducción

Acumulación

Dado que cualquier material puede producir cargas electrostáticas, también puede acumularlas; sin embargo, esta acumulación será significativa cuando permanezca en el tiempo; un *material aislante* (no conductor) o un material conductor que esté aislado de tierra pueden acumular cargas electrostáticas durante mucho tiempo, a veces el suficiente para que la disipación de dichas cargas se manifieste en forma de chispa.

Disipación

Como ya se ha comentado anteriormente, las cargas electrostáticas acumuladas en cualquier material tienden a recombinarse para llegar al equilibrio que perdieron; esto es un hecho físico inevitable. Lo que sí se puede controlar es la velocidad y la forma en la que se recombinan dichas cargas¹¹; estos parámetros depende de diversos factores:

- *Conductividad eléctrica de los materiales: un material aislante* o mal conductor no ofrece un camino fácil para la circulación de las cargas que acumula, por lo que la recombinación será más lenta que en materiales conductores. Por ejemplo: una persona que lleve calzado de goma es más propensa a acumular cargas en su cuerpo que otra que lleve calzado disipativo.
- *Humedad relativa del aire*: cuando el aire tiene una *humedad relativa* elevada, las moléculas de agua se depositan en la superficie de los materiales y aumenta su *conductividad* eléctrica global, incluida su puesta a tierra, facilitando así la disipación de las cargas acumuladas (véase la referencia legal en el apartado 2 del capítulo 5 de este documento).

Si la carga acumulada en un material es lo suficientemente grande, al aproximar dicho material a otro (menos cargado o con carga de distinto signo) o a tierra (con potencial nulo), se producirá una atracción entre las cargas, que puede ser suficiente para hacer que los *electrones* superen el hueco de aire¹² que separa los dos objetos. Una vez que unos pocos *electrones* comienzan a moverse a través de ese hueco de aire, el aire se calienta y se hace más conductor, de modo que cada vez será más fácil que más *electrones* salten el hueco; este efecto en cadena hace que el aire se caliente más rápidamente y se haga virtualmente conductor, produciéndose en ese momento una chispa y un intercambio de energía.

La explosividad de los nanomateriales^{13,14}

Los nanomateriales son considerados como aquellos materiales que contienen partículas con una o más dimensiones en la nanoescala, desde aproximadamente 1 nanómetro (nm) a 100 nm; por tanto, están a medio camino entre el micrómetro y la escala atómica/molecular (alrededor de 0,2 nm).

Desde el punto de vista de la explosividad, una regla general en el comportamiento de los materiales en forma de *polvo* es que cuanto menor es el tamaño de partícula,

¹¹ Los diferentes tipos de descargas que se pueden producir están descritos en el capítulo 4 de este documento.

¹² El aire tiene una rigidez dieléctrica media (E_0) de 30 kV/cm, aunque puede variar entre 10 y 45 kV/cm; depende de la humedad relativa, la presión, la temperatura, el nivel de contaminación del aire y la radiación electromagnética natural.

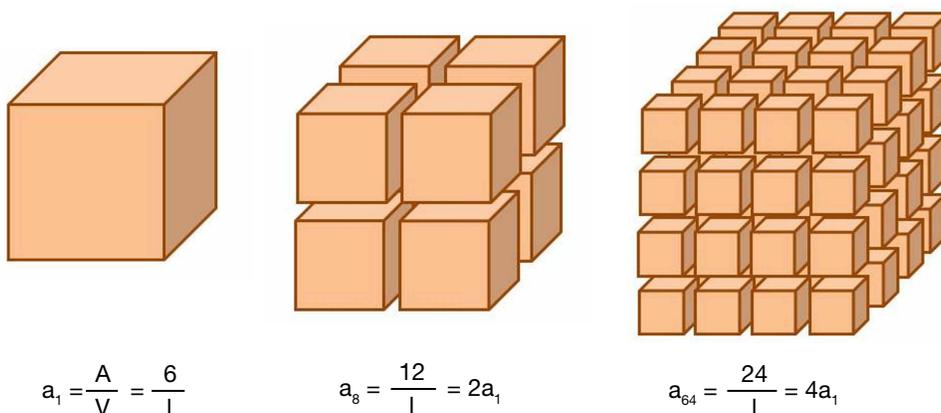
¹³ Artículo “*Review of the Explosibility of Nontraditional Dusts*”, Ind. Eng. Chem. Res., 2012, 51 (22), pp. 7651–7655. American Chemical Society.

“*Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity*” Buzea C., Pacheco Blandino, I.I., Robbie K., <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0801/0801.3280.pdf>

Informe “*Fire and explosion properties of nanopowders*”, Holbrow P., Wall M., Sanderson E., Bennett D., Rattigam W., Bettis R., Gregory D., HSE, 2010. <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr782.pdf>

¹⁴ INSHT, 2015. Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales. <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FICHAS%20DE%20PUBLICACIONES/EN%20CATALOGO/Higiene/2015%20Seguridad%20y%20salud%20en%20el%20trabajo%20con%20nanomateriales/SST%20con%20nanomateriales.pdf>

más fácil es que se inicie una explosión porque el área expuesta a la combustión es mayor en relación con el volumen de partícula (véase la figura 12). Esta regla puede extenderse a los nanomateriales, ya que están constituidos por partículas muy pequeñas y, además, estas presentan una superficie relativa muy extensa debida principalmente a su disposición atómica. Diversos estudios afirman que el *polvo* de nanomateriales puede explotar con tan sólo una pequeña fracción (1/30 – 1/60) de la energía necesaria para la ignición del mismo material en forma de polvo tradicional; este comportamiento se acentúa en el caso de nanopartículas de metales como el aluminio, cuya EMI puede ser inferior a 1 mJ (hasta 1000 veces menos que el *polvo* tradicional).



donde: a_x [1/m] = relación área / volumen o área específica; l [m] = lado del cubo

Figura 12. Influencia del tamaño de partícula en la ignición

Sin embargo, en cuanto a la violencia de la explosión no hay estudios concluyentes al respecto; se ha comprobado que, por lo general, la velocidad máxima de aumento de presión ($R_{m\max}$) disminuye en la nanoescala con relación al mismo parámetro en explosiones de partículas más grandes¹⁵.

Las descargas atmosféricas

Una descarga atmosférica o rayo es una recombinación brusca de las cargas electrostáticas generadas entre una nube y tierra, o bien entre nubes. Los rayos nube-tierra son los más peligrosos desde el punto de vista laboral, ya que pueden suponer un foco de ignición efectivo en áreas con riesgo de incendio o explosión.

¹⁵ "Evaluation of potential safety hazards associated with the use of engineered nanomaterials". 2013. Safe Work Australia, ISBN 978-1-74361-022-0.

Un rayo puede iniciarse en la nube o en tierra y, por otro lado, puede ser positivo o negativo, dependiendo del signo de las cargas desde las que se inicia el rayo. No todos los rayos tienen la misma probabilidad de ocurrencia; los más frecuentes y peligrosos son de una nube negativa hacia tierra (90%). Los rayos que comienzan en tierra son relativamente raros, ocurren normalmente en montañas o en estructuras altas y tienen muy poca incidencia en la generación de accidentes.

Los rayos iniciados en nubes negativas normalmente aparecen en nubes de tormenta del tipo cumulonimbos convectivas y pueden medir entre 3 y 50 km. El mecanismo de producción de un rayo es el siguiente: una vez alcanzados valores suficientemente altos de la intensidad de *campo eléctrico* (del orden de varios miles de V/m), dentro de la nube de tormenta se inicia una descarga precursora (“leader”), poco luminosa, con una corriente eléctrica débil, que progresa a saltos de algunas decenas de metros, siguiendo caminos erráticos pero con avance hacia el suelo. El *campo eléctrico* a nivel del suelo aumenta, siendo más intenso (hasta 500 kV/m) en las partes sobresalientes de la superficie: edificios elevados, árboles, antenas, etc., debido al “*efecto punta*”. Cuando la distancia entre ambos precursores llega a valores de entre 50 y 100 metros, se establece el contacto entre ambos por rebasamiento de la *rigidez dieléctrica del aire*, iniciándose un flujo brusco de cargas hacia el suelo a través del “canal ionizado” que vincula eléctricamente la nube con el suelo (camino conductor). El avance de un rayo se produce a unos 50-100 m/ μ s (unos $2-4 \cdot 10^7$ km/h) con descansos de 50 μ s, alcanzándose temperaturas de hasta 20.000°C. Por ello, se considera que el proceso dentro del “canal ionizado” es una expansión adiabática, es decir, sin intercambio de calor con el medio que lo rodea. En cuanto a la corriente eléctrica puesta en juego, en la figura 13 se muestra su magnitud y evolución típicas en el tiempo en un rayo negativo nube-tierra.

El avance del rayo produce también una expansión brusca del aire, que es la responsable de la onda audible o trueno.

Debido a las diversas formas de energía puestas en juego en un rayo, se puede estimar que la potencia media transportada por este está en el entorno de los 20 gigavatios.

También es interesante señalar que la distribución geográfica y temporal de los rayos es muy heterogénea. En la Península Ibérica existen dos áreas muy activas: el Pirineo Oriental y el Sistema Ibérico (véase la figura 14). No obstante, a excepción del tercio suroccidental, se puede afirmar que la Península Ibérica es una zona con una actividad tormentosa de grado medio¹⁶. En cuanto a la distribución temporal, las observaciones dan como resultado que aproximadamente la mitad de las tor-

¹⁶ Según la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), en la Península Ibérica tienen lugar unas 10.000 tormentas al año; la media mundial es de 760 tormentas/hora, lo que supondría para la superficie peninsular unas 7.600 tormentas al año. Por tanto, la Península Ibérica se encuentra ligeramente por encima de la media mundial en lo que a actividad tormentosa se refiere.

mentas se produce durante el verano, en primavera una cuarta parte y en invierno tan sólo el 10%¹⁷.

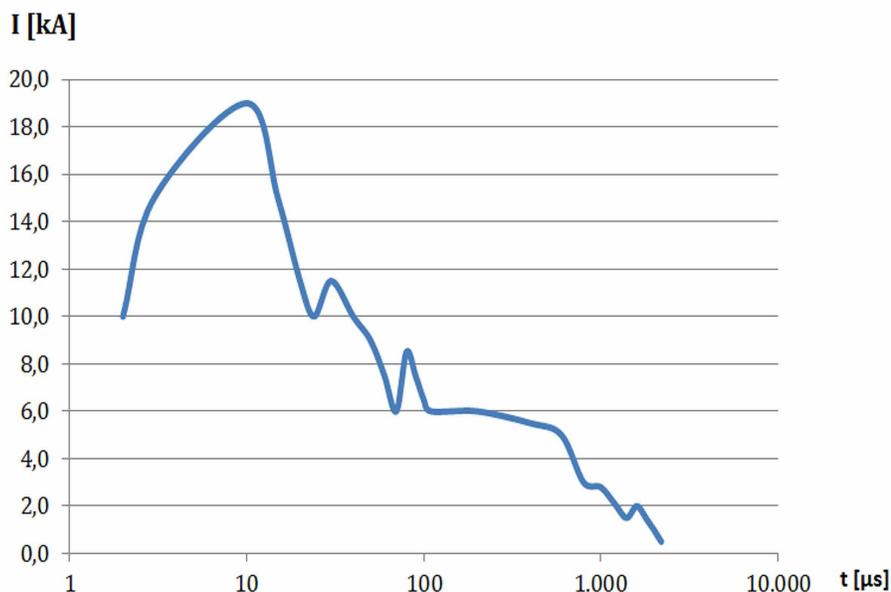


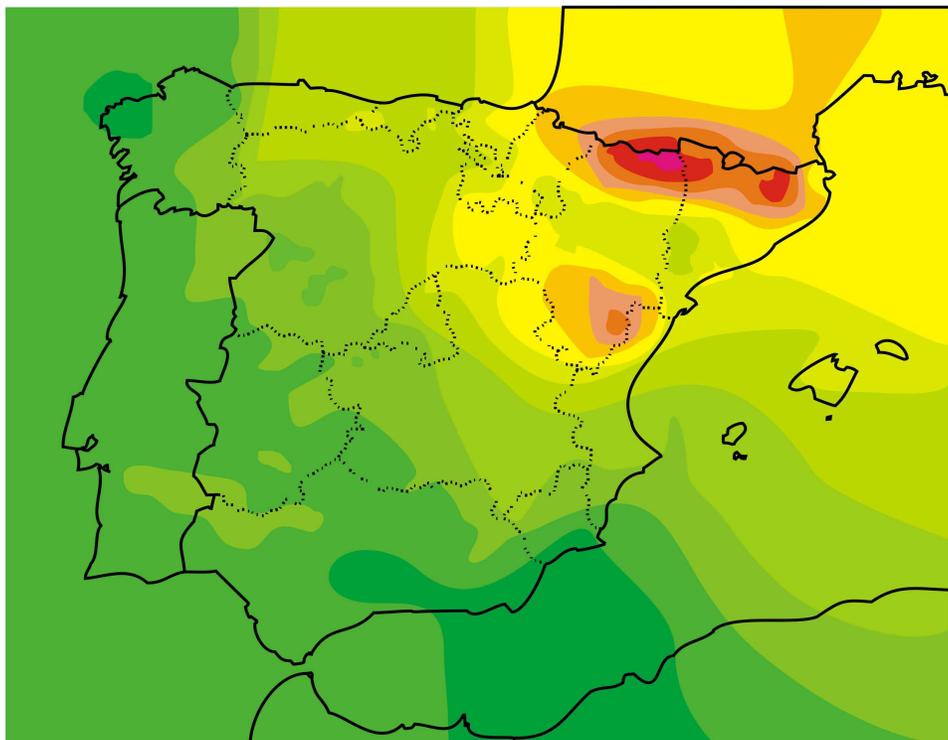
Figura 13. Variación en el tiempo de la intensidad de corriente eléctrica en un rayo

4. RIESGOS Y DAÑOS PARA LA SALUD ASOCIADOS A LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA

La disipación de cargas electrostáticas acumuladas puede producir efectos de muy diversa índole, tanto sobre los trabajadores como sobre el entorno de trabajo. Estos efectos se pueden clasificar en tres grupos:

- a. Accidentes graves
- b. Molestias
- c. Afectación del producto

¹⁷ Climatología de España y Portugal (nueva versión), Font Tullot, I., 2000. ISBN 9788478009442.



Áreas isoceránicas: nº de días al año con actividad tormentosa (entre paréntesis: nº impactos/año.km²)



Figura 14. Actividad tormentosa o nivel cerámico en la Península Ibérica¹⁸

a. Accidentes graves

El riesgo de accidente se puede materializar cuando se presenta un foco de ignición efectivo en presencia de una *atmósfera explosiva*, pues puede constituir el inicio de un incendio o una explosión. Por tanto, para que se produzca este tipo de accidentes, deben darse las siguientes condiciones:

¹⁸ FUENTES:

- Código Técnico de la Edificación. Exigencia Básica SUA 8. Seguridad frente al riesgo relacionado con la acción del rayo;
- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), www.aemet.es;
- www.eltiempo.com

- Existencia de un medio efectivo de generación de carga electrostática.
- Existencia de un medio de acumulación de cargas aisladas.
- Disipación de las cargas acumuladas (descarga) con una energía superior a la *energía mínima de inflamación* de la *atmósfera explosiva* presente (EMI).

Otro factor importante a tener en cuenta es que, según la naturaleza de los materiales puestos en juego, existen diversas **formas** físicas de producirse las descargas electrostáticas; en algunas de ellas se libera más cantidad de energía que en otras; por tanto, algunas descargas son más problemáticas que otras.

Descarga en forma de *chispa*

Se producen generalmente entre dos materiales **conductores** que se mantienen **aislados** (no conectados a tierra): bidones metálicos, personas, secciones aisladas de tuberías de proceso, líquidos conductores contenidos en recipientes plásticos aislantes, acumulación de carga en *polvos* de baja *resistividad*, etc. La energía asociada a una descarga de este tipo se libera de forma concentrada en una sola chispa observable a simple vista que puede superar los 100 mJ de energía, salvo cuando se produce entre personas que no suele superar los 10 mJ.

En este tipo de descargas el cálculo de la energía liberada es sencillo (véase el ejemplo de la figura 9, aplicado a un persona que se carga mientras camina).

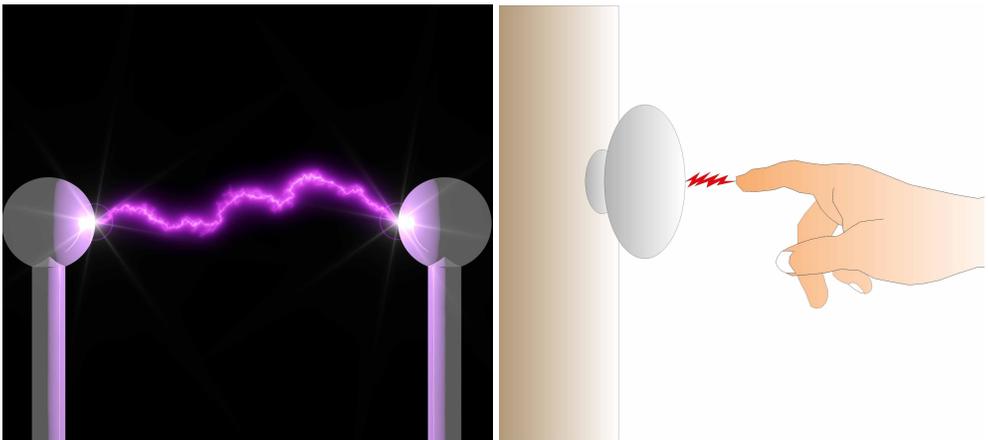


Figura 15. Descargas en forma de chispa

Descarga en forma de *corona*

Se puede producir por una gran acumulación de cargas en las regiones puntiagudas¹⁹ de un **conductor** cargado; estas cargas crean un campo electrostático muy intenso²⁰ capaz de producir la ruptura dieléctrica del aire en las inmediaciones de estas regiones; así, si se acerca otro objeto conductor puesto a tierra, se producirá una descarga en forma de haz desde los extremos puntiagudos del objeto cargado. La intensidad del campo disminuye rápidamente y la región ionizada de la descarga desaparece a poca distancia. Suele manifestarse mediante una pequeña luminosidad entre la punta y el objeto cargado. La energía liberada en este tipo de descarga es muy baja, por lo que solamente pueden provocar la ignición de sustancias muy sensibles (EMI < 0,025 mJ).

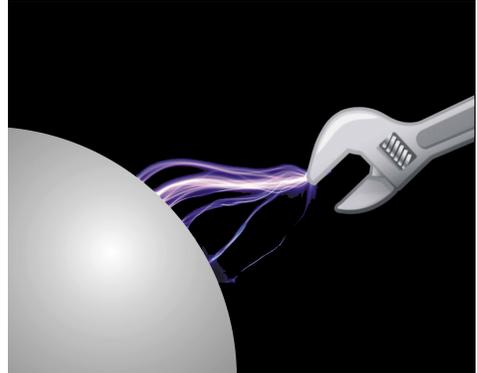


Figura 16. Descarga en forma de corona

Descarga en forma de *brocha*, cepillo o abanico

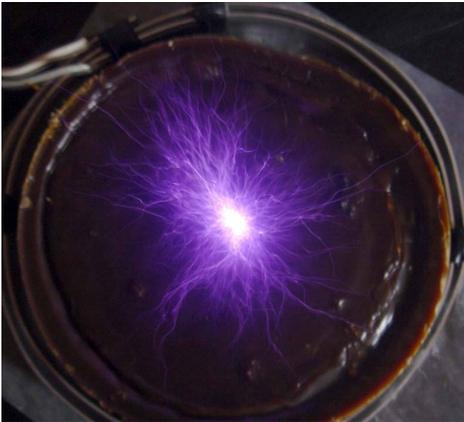


Figura 17. Descarga en forma de brocha²²

Esta forma de descarga electrostática es un tipo particular de descarga corona que tiene lugar entre dos electrodos curvos²¹ puestos a tierra incrustados en un medio no **conductor** y se caracteriza por débiles y claras bifurcaciones compuestas por partículas ionizadas. Estas descargas pueden ocurrir entre un material plástico aislante cargado y un material conductor; por ejemplo: entre un rodillo aislante y una lámina metálica en un proceso de laminación en continuo; entre sacos de plástico aislante y elementos conductores puestos a tierra (incluido el propio trabajador cuando lle-

¹⁹ Radio de curvatura inferior a 0,5 mm.

²⁰ En ocasiones el campo electrostático puede superar los 3 MV/m.

²¹ Radio de curvatura superior a 5 mm.

²² Imagen cortesía de Jeff Behary (www.electrotherapymuseum.com), EE.UU.

va calzado antiestático); entre la superficie de un líquido aislante cargado y los elementos metálicos que lo contienen; entre una sonda de nivel que se introduce en un silo y el material que este contiene, etc. A diferencia de las chispas, en este mecanismo se descarga solamente una parte de la carga acumulada y la energía liberada no suele superar los 4 mJ, por lo que es menos probable que provoque la ignición de una *atmósfera explosiva* que otros tipos de descargas (por ejemplo, la chispa). Este tipo de descarga puede incendiar mezclas de gases o vapores *inflamables* pero no suele ser capaz de incendiar nubes de *polvo*, salvo si están mezcladas con las anteriores (mezclas mixtas).

Descarga en forma de haz, haz deslizante o *abanico propagante*

Se puede producir en situaciones que generen mucha carga en materiales de alta *resistividad*; por ejemplo: al separar rápidamente una lámina **aislante** de un elemento conductor puesto a tierra. Es una forma de descarga que se presenta con cierta frecuencia en los siguientes procesos:

- Transporte neumático de *polvos* a través de conductos metálicos revestidos de material no conductor.
- Transmisión mediante correas.
- Limpieza de efluentes gaseosos en un ciclón con revestimiento interno.
- Llenado de sacos tipo FIBC o “big bag” aislantes mediante conductos puestos a tierra (más información en el apartado 8.5 de este documento).
- Transporte de *material aislante* laminado mediante rodillos o cinta transportadora a alta velocidad.
- Pulverización electrostática de pintura en *polvos*.

La disipación se manifiesta normalmente por una descarga ramificada acompañada de un fuerte chasquido. En ocasiones la energía liberada puede superar 1 J, por lo que pueden ser foco efectivo en *atmósferas explosivas* de cualquier naturaleza.

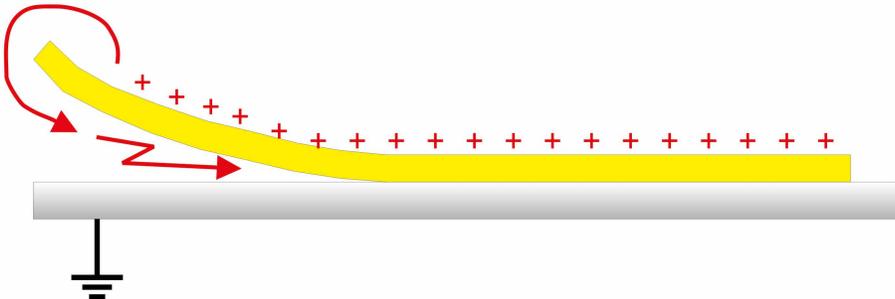


Figura 18. Descarga en forma de abanico propagante

Descarga en forma de cono

Este tipo de descarga debe su nombre a la forma que adquiere al propagarse por la superficie libre de sólidos pulverulentos aislantes almacenados a granel en silos. Es más frecuente si el material es **muy aislante** (*polvo* a granel de *resistividad* superior a $10^{10} \Omega \cdot m$) y se lleva hacia el silo mediante transporte neumático, ya que de este modo adquiere mucha más carga electrostática. Suele manifestarse en forma de haces desplazándose sobre la superficie del material en dirección radial hacia las paredes del contenedor.

La energía liberada en este tipo de descargas puede oscilar entre los 10 mJ en *polvos* finos hasta más de 100 mJ en materiales con una granulometría más gruesa.

La bibliografía existente recoge una modelización de la energía que se puede acumular en este tipo de almacenamientos²³:

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

donde: W [mJ] = máxima energía liberada en la descarga del cono

D [m] = diámetro del contenedor conectado a tierra

d [mm] = tamaño medio de las partículas

NOTA: esta expresión es aplicable a recipientes de 0,5 a 3 m de diámetro y *polvos* de tamaño medio entre 0,1 y 3 mm.

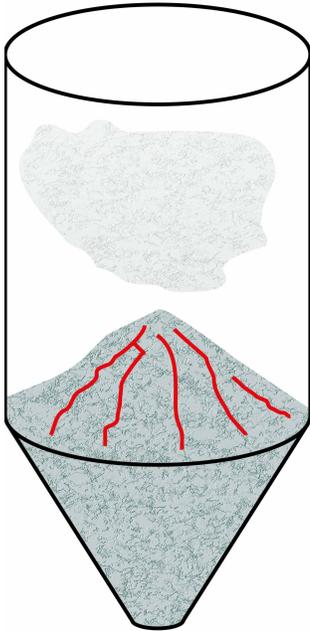


Figura 19. Descarga en forma de cono

Según se deduce de esta fórmula, las descargas en cono procedentes de *polvo* más grueso son de mucha mayor energía que las de *polvo* fino. La situación más peligrosa se da cuando se manipulan gránulos de hasta unos 0,5 mm de tamaño (mayor generación de carga) mezclados con *polvo* fino que puede formar nubes de EMI baja (mayor sensibilidad a la ignición); este fenómeno se ha observado en la manipulación (llenado / vaciado) de materias granulares poliméricas en grandes contenedores o en silos.

La tabla 6 recoge de forma resumida la eficacia como foco de ignición de cada una de las formas de descarga descritas.

²³ "Overview of the occurrence and incendency of cone discharges with case studies from industrial practice", Glor, M. 2001

Tabla 6
Descargas electrostáticas: eficacia como fuentes de ignición

TIPO DE DESCARGA	EMI típica (mJ)	EFICACIA COMO FUENTE DE IGNICIÓN PARA MEZCLAS DE AIRE CON...		
		Hidrógeno, acetileno, etc. (EMI ≤ 0,025 mJ)	Disolventes orgánicos (0,025 < EMI < 1 mJ)	Polvos combustibles (incl. nanomateriales) (EMI > 1 mJ)
CHISPA	(< 200)			
- Pequeños objetos de metal	1 – 2	+	+	+
- Pequeños contenedores (~50 l)	1 – 10			
- Contenedores medianos (~200 l)	5 – 30			
- Elementos de proceso (reactor, etc.)	10 – 100			
- Personas	10 – 30			
- Camiones cisterna	< 100			
CONO	10 – 100	+	+	(*) (**)
ABANICO PROPAGANTE	1 – 10	+	+	+
BROCHA, CEPILLO O ABANICO	1 – 5	+	+	(*) (**)
CORONA	< 0,1	+	-	-

(*) Puede producirse la ignición de polvos con gran sensibilidad (EMI<10mJ)

(**) La sensibilidad a la ignición depende en gran medida del tipo de material y del tamaño de partícula

Riesgos laborales producidos por los rayos

Existen ciertas actividades industriales que son especialmente vulnerables al fenómeno de los rayos, entre las que se pueden destacar las siguientes:

- Química
- Petroquímica
- Alimentaria
- Farmacéutica

Según INERIS, el Organismo nacional francés del entorno industrial y de los riesgos, “una de cada cuatro instalaciones industriales recibe el impacto de un rayo al menos una vez cada cinco años”. Si a este dato se le añade que el riesgo de incendio por descargas electrostáticas disruptivas es una de las causas más frecuentes de incendios y explosiones en plantas industriales, el control de los daños

derivados de este fenómeno es esencial para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores.

Si se aplica de forma sencilla la exigencia básica SUA 8 del Código Técnico de la Edificación (véase el punto 5.7 de este documento), se puede conseguir una primera aproximación al nivel de peligrosidad de los rayos en entornos laborales, así como al sistema de protección que se necesita para dicho nivel. En el capítulo 7. **Medidas preventivas y de protección** de este documento se describen algunos ejemplos de aplicación de la citada normativa.

b. Molestias

En general, las descargas electrostáticas de personas no son peligrosas pero pueden agravar otras situaciones; por ejemplo: si un trabajador realiza trabajos en altura, ante una descarga electrostática su reacción puede provocar una caída a distinto nivel.

Se han realizado experimentos en los que una descarga a tierra de un objeto conductor a través de una persona, si el potencial acumulado en el objeto es del orden de 10 kV, puede llegar a liberar una energía de unos 10 mJ, valor insuficiente para producir daño (véase la figura 20).

Las descargas también se pueden producir en entornos seguros, es decir, en donde no se agraven otras situaciones laborales; en estos casos, si el fenómeno se presenta con mucha frecuencia, puede generar situaciones de disconfort. Para corregir el problema se puede acudir a técnicas de Ergonomía Ambiental, tales como el aumento de la *humedad relativa del aire* (véase la referencia legal 5.2) o el empleo de suelos disipativos (véase el punto 7.8).

c. Afectación del producto

La presencia de cargas electrostáticas acumuladas puede afectar negativamente a diversos procesos productivos; algunos de ellos son especialmente sensibles a este fenómeno, por ejemplo:

- La fabricación y montaje de equipos electrónicos: una descarga electrostática puede producir daños o disfunciones, especialmente en los circuitos integrados (véase la figura 21).
- Las producciones en continuo (textil, papelera, etc.): las cargas electrostáticas generadas en el proceso pueden atraer suciedad o polvo, apilamientos o empaquetados incorrectos o incluso provocar atascos.
- El transporte de materiales en estado sólido (polvos) o líquido: las cargas electrostáticas pueden producir atascos en las conducciones.

Estos efectos adversos pueden provocar paradas no programadas, baja productividad y una mala calidad del producto final, con la consiguiente pérdida económica.

V (V)	E (mJ)	Sensación
316.228	10.000	Quemadura
100.000	1.000	Pinchazo doloroso
31.622,80	100	Pinchazo agudo
10.000	10	Pinchazo
3.162,28	1	Umbral de percepción
1.000	0,1	Imperceptible

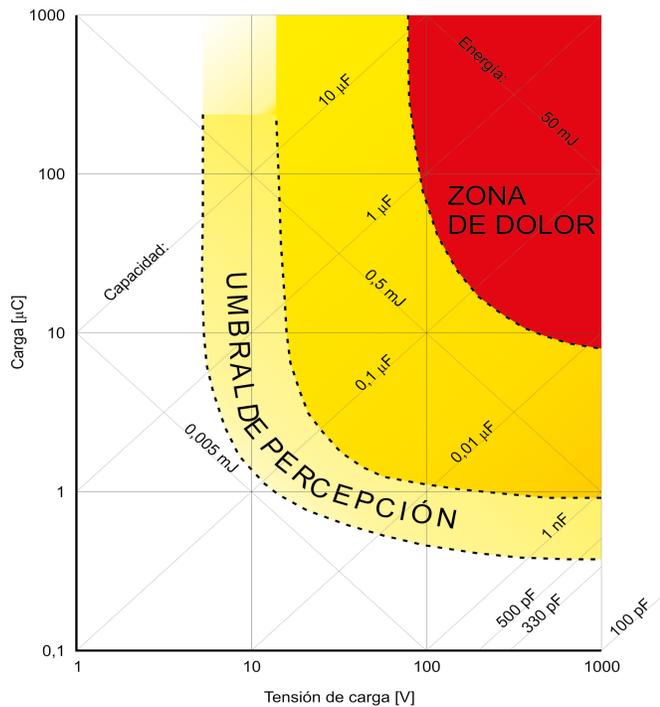


Figura 20. Grado de percepción de las descargas electrostáticas en función de la energía liberada²⁴

²⁴ Norma UNE-IEC/TS 60479-2:2010 EX.

Desde el punto de vista preventivo, cabe hacer una mención especial al caso de los equipos electrónicos (véase la figura 21): la tecnología electrónica se utiliza cada vez más en aplicaciones de seguridad y las tecnologías electrónicas pueden sufrir una degradación de sus funciones (o incluso un fallo completo) cuando están expuestas a perturbaciones de naturaleza electromagnética, entre las que se encuentra el fenómeno electrostático; una descarga estática puede afectar a máquinas y/o equipos electrónicos, de forma que puedan sufrir daños o disfunciones con consecuencias preventivas.

La Compatibilidad Electromagnética (CEM) es la capacidad de que un equipo funcione de forma satisfactoria en su entorno electromagnético y sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables para otros equipos en ese entorno. En consecuencia, los errores y el mal funcionamiento de los dispositivos electrónicos debido a una inadecuada CEM pueden dar lugar a situaciones peligrosas con riesgo de daño a la salud y seguridad de los trabajadores.

Ejemplo: una interferencia en el controlador de lógica programable (PLC) del sistema de mando de una máquina puede provocar un movimiento intempestivo de la misma, con el consiguiente riesgo para los trabajadores de sufrir daños de diferente gravedad.

En el marco europeo de seguridad en el producto, este aspecto está regulado por la Directiva 2004/108/CE, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros en materia de compatibilidad electromagnética, transpuesta a la legislación nacional por el Real Decreto 1580/2006, de 22 de diciembre, por el que se regula la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos, armonizando las disposiciones nacionales de protección frente a las perturbaciones electromagnéticas, para garantizar en este ámbito y en el funcionamiento del mercado interior la libre circulación de aparatos eléctricos y electrónicos. Este real decreto regula la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos que puedan crear perturbaciones electromagnéticas o cuyo normal funcionamiento pueda verse perjudicado por dichas perturbaciones, exigiendo que cumplan un nivel adecuado de compatibilidad electromagnética. Para el cumplimiento de sus requisitos en el ámbito de la inmunidad, se pueden destacar las siguientes normas armonizadas:

- Norma UNE-EN 61000-6-1:2007. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 6: Normas genéricas. Sección 1: Inmunidad en entornos residenciales, comerciales y de industria ligera.
- Norma UNE-EN 61000-6-2:2006. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 6-2: Normas genéricas. Inmunidad en entornos industriales.

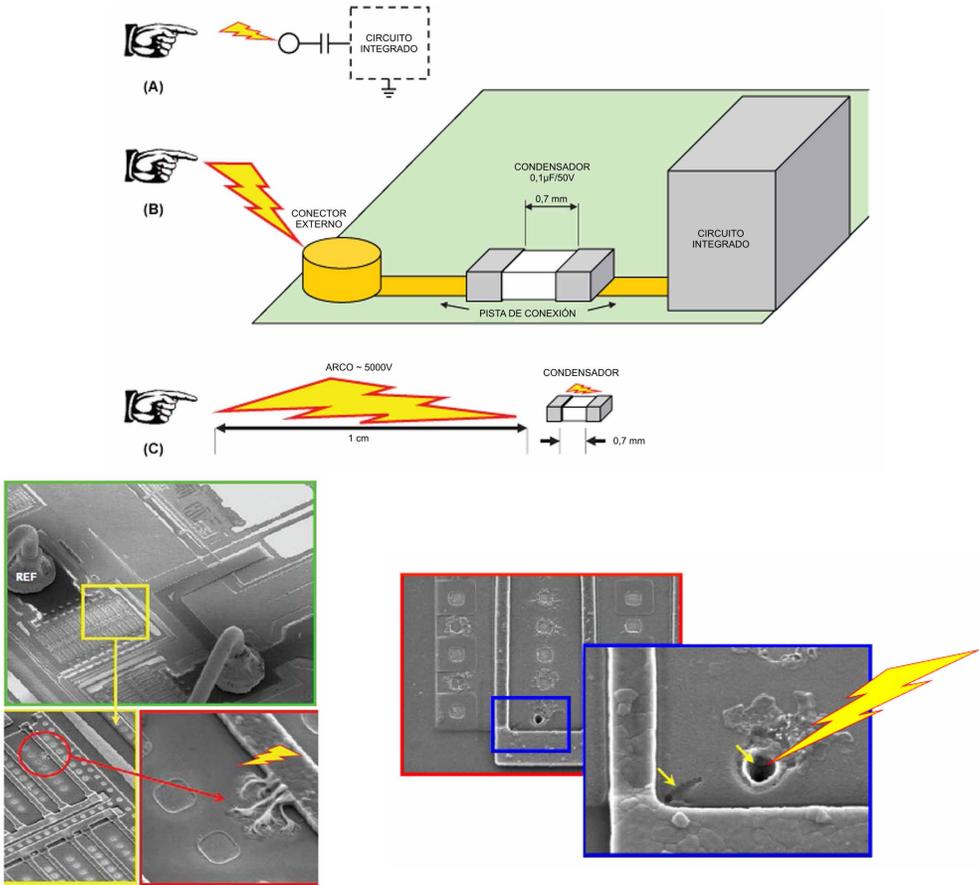


Figura 21. Descargas electrostáticas en dispositivos electrónicos: esquema de descarga y daños causados ²⁵

En el caso particular de las descargas electrostáticas, es de interés la norma de ensayo UNE-EN 61000-4-2. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-2: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayo de inmunidad a las descargas electrostáticas, que concierne a los requisitos de inmunidad y métodos de ensayo para equipos eléctricos y electrónicos sometidos a descargas de electricidad estática producidas directamente por los operadores y entre personas y objetos situados en las proximidades.

²⁵ Copyright Maxim Integrated Products (<http://www.maximintegrated.com>). Used by permission.

Como medida de protección adicional para evitar daños provocados por las descargas electrostáticas, los componentes o repuestos de circuitos electrónicos se suelen comercializar en embalajes antiestáticos, los cuales se pueden identificar con el marcado que recoge la figura 22.



Figura 22. Marcado antiestático para el embalaje de productos electrónicos

Lipoatrofia semicircular

Una de las dolencias que se relaciona con la electricidad estática es la denominada lipoatrofia semicircular, que es un trastorno de la grasa subcutánea consistente en la destrucción del tejido adiposo y cuya manifestación clínica habitual es un hundimiento en las caras anterior y lateral de los muslos y, ocasionalmente, de los antebrazos. En el caso de las piernas, el trastorno aparece a una altura aproximada de 72 centímetros con respecto al suelo, que coincide con la del tablero de las mesas de trabajo.

Actualmente la información técnica que existe sobre esta dolencia es escasa, lo que la convierte en idiopática (sin causa conocida); además, se piensa que es un trastorno de origen multifactorial, por lo que en el caso de que la electricidad estática entre en juego, es posible que no sea la única causa.

Este tipo de atrofia se trata más de un defecto estético que de una enfermedad propiamente dicha, puesto que es una lesión benigna, no causa dolor físico y es reversible.

La hipótesis más apoyada para explicar la generación de esta atrofia en personas que trabajan en oficinas, es la acumulación de electricidad estática en estos lugares en los que, al producirse microtraumatismos por descargas internas, activan los macrófagos, destruyendo células grasas en determinadas zonas. Aunque hay que tener en cuenta que las lesiones suelen desaparecer tras eliminar la exposición.

Este hecho podría explicar, además, la gran descompensación que existe en la proporción de los efectos entre hombres y mujeres (entre el 10% y el 15% de los casos totales detectados), que podría estar relacionada con una diferente disposición del tejido graso en la zona de los muslos.

Las medidas correctoras para evitar esta lesión se enfocan principalmente en la reducción de la electricidad estática en los lugares en los que se produce, de forma que se tratará de evitar el uso de tejidos que acumulen carga electrostática; esto se puede concretar evitando fibras artificiales tanto en la ropa de las personas como en el revestimiento del mobiliario del local de trabajo. También se deben evitar las mesas con cantos estrechos, siendo preferibles las mesas con bordes anchos y redondeados. Además, se ha demostrado que una elevación de la humedad relativa del aire de los locales por encima del 45% impide la acumulación de cargas electrostáticas en las superficies, con la consiguiente reducción en la aparición y prevalencia de los casos de lipoatrofia semicircular.

5. NORMATIVA APLICABLE

En este capítulo se describe brevemente la normativa legal y técnica que regula de algún modo el riesgo electrostático.

5.1. Real Decreto 614/2001: Protección de los trabajadores frente al riesgo eléctrico. Anexo VI.B. Trabajos en emplazamientos con riesgo de incendio o explosión. Electricidad estática

Esta disposición legal establece las siguientes condiciones:

1. *En todo lugar o proceso donde pueda producirse una acumulación de cargas electrostáticas deberán tomarse las medidas preventivas necesarias para **evitar las descargas peligrosas** y particularmente, la producción de chispas en emplazamientos con riesgo de incendio o explosión. A tal efecto, deberán ser objeto de una especial atención:*
 - a *Los procesos donde se produzca una **fricción continuada** de materiales aislantes o aislados.*
 - b *Los procesos donde se produzca una **vaporización o pulverización** y el **almacenamiento, transporte o trasvase de líquidos o materiales en forma de polvo**, en particular, cuando se trate de **sustancias inflamables**.*

Algunos ejemplos de los procesos mencionados son los siguientes:

- a. *“Procesos donde se produzca una fricción continuada de materiales aislantes o aislados”*: caminar sobre suelo aislante, transporte de material mediante rodillos, etc.

- b. “Procesos donde se produzca una vaporización o pulverización y el almacenamiento, transporte o trasvase de líquidos o materiales en forma de polvo, en particular, cuando se trate de sustancias inflamables”: pintura a pistola; trasvase de combustibles líquidos; vertido libre de áridos, harinas u otras sustancias pulverulentas susceptibles de acumular cargas electrostáticas; limpieza de gases de escape de hornos; etc.

Estos procesos están recogidos y descritos con detalle en el apartado 3.1 de este documento.

- c. Para **evitar la acumulación de cargas electrostáticas** deberá tomarse alguna de las siguientes medidas, o combinación de las mismas, según las posibilidades y circunstancias específicas de cada caso:
- Eliminación o reducción de los **procesos de fricción**.
 - Evitar, en lo posible, los procesos que produzcan **pulverización, aspersión o caída libre**.
 - Utilización de **materiales antiestáticos** (poleas, moquetas, calzado, etc.) o aumento de su conductividad (por incremento de la humedad relativa, uso de aditivos o cualquier otro medio).
 - Conexión a tierra, y entre sí** cuando sea necesario, de los materiales susceptibles de adquirir carga, en especial, de los conductores o elementos metálicos aislados.
 - Utilización de **dispositivos específicos para la eliminación de cargas electrostáticas**. En este caso la instalación no deberá exponer a los trabajadores a radiaciones peligrosas.
 - Cualquier otra medida para un proceso concreto que garantice la no acumulación de cargas electrostáticas.

En el capítulo 6 de este documento se describen algunos procedimientos para evitar la acumulación de cargas electrostáticas en diversos procesos.

5.2. Real Decreto 486/1997: Seguridad y salud en los lugares de trabajo. Anexo III: Condiciones ambientales

Esta disposición legal establece la siguiente condición:

3. En los **locales de trabajo cerrados...** La **humedad relativa** estará comprendida entre el 30 y el 70%, excepto en los locales donde existan **riesgos por electricidad estática** en los que el **límite inferior** será el **50%**.

Las condiciones del entorno de trabajo también pueden contribuir a la manifestación del fenómeno electrostático; por ejemplo: si la humedad ambiental es baja, las cargas electrostáticas acumuladas tienen mayor dificultad para moverse sobre los objetos que las contienen y, por tanto, para disiparse sin generar chispas peligrosas. Se ha comprobado que, si se mantiene la *humedad relativa* ambiental en niveles de, al menos, el 50%, se formará sobre la superficie de los objetos una película de humedad lo suficientemente conductora como para permitir un drenaje eficaz de dichas cargas.

Para conseguir los niveles de *humedad relativa* citados, lo ideal es que en el diseño del sistema de climatización se tenga en cuenta esta circunstancia y se dimensione y ajuste para conseguir dichos niveles; en caso de que el problema se haya manifestado después de la instalación del sistema, se deberá aumentar la *humedad relativa* por otros procedimientos (instalación de accesorios en el sistema de climatización para la humectación del aire, empleo de humidificadores de aire autónomos, etc.).

5.3. Real Decreto 681/2003: Protección de los trabajadores frente a los riesgos de atmósferas explosivas. Anexo II-A. Disposiciones mínimas destinadas a mejorar la seguridad y la protección de la salud de los trabajadores potencialmente expuestos a atmósferas explosivas

Esta disposición legal establece las siguientes condiciones:

2. *Medidas de protección contra las explosiones.*

[...]

- 2.3. De conformidad con lo dispuesto en el Real Decreto 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico, cuando se trate de evitar los riesgos de ignición con arreglo al artículo 3, también **se deberán tener en cuenta las descargas electrostáticas producidas por los trabajadores o el entorno de trabajo como portadores o generadores de carga**. Se deberá proveer a los trabajadores de **calzado antiestático** y ropa de trabajo adecuada hecha de materiales que no den lugar a descargas electrostáticas que puedan causar la ignición de atmósferas explosivas.

Las instalaciones y equipos eléctricos pueden ser fuentes de ignición efectivas cuando se utilizan en presencia de *atmósferas explosivas*. Dentro de las fuentes de ignición efectivas relacionadas con instalaciones y equipos eléctricos se incluyen las descargas electrostáticas. En el punto 5.4 de este documento se menciona la normativa que deben cumplir instalaciones y equipos para evitar o controlar el riesgo de ignición.

Los trabajadores, por otro lado, por el simple hecho de moverse en su entorno de trabajo, pueden producir y acumular cargas electrostáticas en sí mismos. Este fenómeno es importante cuando se trabaja en zonas en las que se pueden formar *atmósferas potencialmente explosivas*, ya que su manifestación en forma de descarga disruptiva (chispa) puede ser origen de un incendio o una explosión. La solución más eficaz para controlar el riesgo es proporcionar a las cargas acumuladas un camino a tierra lo más eficaz posible; para ello, se deberá dotar a los trabajadores de calzado, ropa y complementos de trabajo disipativos, combinados con un suelo que tenga una *conductividad* adecuada.

El calzado y la ropa deben estar certificados de acuerdo con el Real Decreto 1407/1992 (véase el punto 5.6 de este documento).

Por su parte, el suelo deberá tener unas características disipativas determinadas y controlables, de modo que pueda continuar hacia tierra el camino disipativo que se ha propiciado con el calzado disipativo (véase el punto 7.8 de este documento).

El Real Decreto 681/2003 también establece directrices a tener en cuenta para la realización de evaluaciones de riesgos específicas (véase el capítulo 6 de este documento).

5.4. Real Decreto 400/1996: Aparatos para uso en atmósferas explosivas. Anexo II. Requisitos esenciales sobre seguridad y salud relativos al diseño y fabricación de aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas

Este real decreto forma parte de la normativa de seguridad en el producto; para que un aparato o sistema de protección puedan ser comercializados en la Unión Europea deberán cumplir con los requisitos esenciales de seguridad y salud recogidos en el anexo II del real decreto. En la práctica, el cumplimiento de estos requisitos se evidencia con la declaración CE de conformidad, el marcado CE y además, en este caso, otras marcas específicas en función del entorno en el que se vaya a instalar y/o utilizar el aparato o sistema de protección²⁶.

²⁶ Para más información, consúltese el Apéndice 4. Equipos para uso en atmósferas explosivas de la Guía Técnica del INSHT para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

Para el caso concreto de las descargas electrostáticas, esta disposición establece la siguiente condición:

1. Requisitos comunes relativos a los aparatos y a los sistemas de protección

4. Focos potenciales de ignición.

2º. Peligros originados por la electricidad estática.

*Deberán evitarse, por medio de medidas adecuadas, las **cargas electrostáticas** susceptibles de provocar descargas peligrosas.*

Se debe admitir que los productos adquiridos que cumplan la normativa anterior son seguros para su puesta a disposición de los trabajadores.

5.5. Real Decreto 842/2002 – ITC-BT-29: Prescripciones particulares para las instalaciones eléctricas de los locales con riesgo de incendio o explosión

Esta disposición legal forma parte de la normativa de seguridad en el producto y concreta los requisitos esenciales establecidos por el Real Decreto 400/1996 para los equipos e instalaciones eléctricas de baja tensión. La ITC-BT-29 tiene por objeto especificar las reglas esenciales para el diseño, ejecución, explotación, mantenimiento y reparación de las instalaciones eléctricas en emplazamientos en los que existe riesgo de explosión o de incendio debido a la presencia de sustancias inflamables para que dichas instalaciones y sus equipos no puedan ser, dentro de límites razonables, la causa de inflamación de dichas sustancias.

5.6. Real Decreto 1407/1992: Condiciones para la comercialización y libre circulación intracomunitaria de los equipos de protección individual

Esta disposición legal forma parte de la normativa de seguridad en el producto y establece las condiciones que deben reunir los equipos de protección individual para su comercialización y libre circulación en la Unión Europea; también establece las exigencias esenciales de sanidad y seguridad que deben cumplir los equipos de protección individual (anexo II) para preservar la salud y garantizar la seguridad de los usuarios, siempre que su mantenimiento sea adecuado y se utilicen de acuerdo con su finalidad.

Concretamente, la exigencia 2.6 del anexo II establece lo siguiente:

“EPI destinados a servicios en atmósferas potencialmente explosivas.

Los EPI destinados a ser usados en atmósferas potencialmente explosivas se diseñarán y fabricarán de tal manera que no pueda producirse en ellos ningún arco o chispa de origen eléctrico, electrostático o causados por un golpe, que puedan inflamar una mezcla explosiva”.

5.7. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación – Exigencia básica SUA 8: Seguridad frente al riesgo relacionado con la acción del rayo

Esta disposición legal constituye el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE).

En relación con las descargas electrostáticas atmosféricas, el CTE establece lo siguiente:

“Se limitará el riesgo de electrocución y de incendio causado por la acción del rayo, mediante instalaciones adecuadas de protección contra el rayo”.

El desarrollo normativo de esta prescripción está recogido en la Exigencia Básica SUA 8: Seguridad frente al riesgo causado por la acción del rayo, del Documento Básico DB-SUA: Seguridad de Utilización y Accesibilidad, del citado CTE:

1 Procedimiento de verificación

- 1 *Será necesaria la instalación de un **sistema de protección contra el rayo**, en los términos que se establecen en el apartado 2, cuando la frecuencia esperada de impactos N_e sea mayor que el riesgo admisible N_a .*
- 2 *Los edificios en los que se manipulen sustancias tóxicas, radioactivas, altamente **inflamables** o explosivas y los edificios cuya altura sea superior a 43 m dispondrán siempre de sistemas de protección contra el rayo de eficiencia E superior o igual a 0,98, según lo indicado en el apartado 2.*
- 3 *La frecuencia esperada de impactos, N_e , puede determinarse mediante la expresión:*

$$N_e = N_g A_e C_1 10^{-6} \text{ [n}^\circ \text{ impactos/año]}$$

siendo:

N_g : densidad de impactos sobre el terreno (n° impactos/año, km^2)²⁷.

A_e : superficie de captura equivalente del edificio aislado en m^2 , que es la delimitada por una línea trazada a una distancia $3H$ de cada uno de los puntos del perímetro del edificio, siendo H la altura del edificio en el punto del perímetro considerado.

C_1 : coeficiente relacionado con el entorno, según la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Coeficiente C_1

Situación del edificio	C_1
Próximo a otros edificios o árboles de la misma altura o más altos	0,5
Rodeado de edificios más bajos	0,75
Aislado	1
Aislado sobre una colina o promontorio	2

4 El riesgo admisible, N_a , puede determinarse mediante la expresión:

$$N_a = \frac{5,5}{C_2 C_3 C_4 C_5} 10^{-3}$$

siendo:

C_2 : coeficiente en función del tipo de construcción, conforme a la tabla 1.2;

C_3 : coeficiente en función del contenido del edificio, conforme a la tabla 1.3;

C_4 : coeficiente en función del uso del edificio, conforme a la tabla 1.4;

C_5 : coeficiente en función de la necesidad de continuidad en las actividades que se desarrollan en el edificio, conforme a la tabla 1.5.

Tabla 1.2 Coeficiente C_2

	Cubierta metálica	Cubierta de hormigón	Cubierta de madera
Estructura metálica	0,5	1	2
Estructura de hormigón	1	1	2,5
Estructura de madera	2	2,5	3

Tabla 1.3 Coeficiente C_3

Edificio con contenido inflamable	3
Otros contenidos	1

²⁷ Véase la figura 13 de este documento.

Tabla 1.4 Coeficiente C_4

Edificios no ocupados normalmente	0,5
Usos <i>Pública Concurrencia, Sanitario, Comercial, Docente</i>	3
Resto de edificios	1

Tabla 1.5 Coeficiente C_5

Edificios cuyo deterioro pueda interrumpir un servicio imprescindible (hospitales, bomberos,...) o pueda ocasionar un impacto ambiental grave	5
Resto de edificios	1

2 Tipo de instalación exigido

- 1 La eficacia E requerida para una instalación de protección contra el rayo se determina mediante la siguiente fórmula:

$$E = 1 - \frac{N_a}{N_e}$$

- 2 La tabla 2.1 indica el nivel de protección correspondiente a la eficiencia requerida. Las características del sistema para cada nivel de protección se describen en el Anexo SU B:

Tabla 2.1 Componentes de la instalación

Eficiencia requerida	Nivel de protección
$E \geq 0,98$	1 (más bajo)
$0,95 \leq E < 0,98$	2
$0,80 \leq E < 0,95$	3
$0 \leq E < 0,80$ ⁽¹⁾	4 (más alto)

⁽¹⁾ Dentro de estos límites de eficiencia requerida, la instalación de protección contra el rayo no es obligatoria.

El punto 8.5 de este documento recoge dos ejemplos de aplicación de esta normativa.

5.8. Real Decreto 97/2014, de 14 de febrero, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español

Esta disposición legal forma parte de la normativa sobre transporte de mercancías peligrosas por carretera; tiene por objetivo adaptarse a las normas europeas vi-

gentes sobre la materia y desarrollar normas internas para regular el transporte por carretera de mercancías peligrosas en los aspectos que o bien no se contemplan en el ADR²⁸, o bien dejen libertad a los Estados para su desarrollo o concreción.

Concretamente, su artículo 44 regula el procedimiento de carga y descarga con una mención expresa a los posibles efectos derivados de las descargas electrostáticas durante el trasvase de materiales combustibles:

Artículo 44. Procedimiento de carga y descarga.

1. *El cargador/descargador de cisternas realizará las operaciones de carga o descarga teniendo en cuenta las indicaciones del expedidor sobre la mercancía, los informes que al respecto sean emitidos por el consejero de seguridad en el ejercicio de sus funciones y el resto de informaciones relevantes para la carga/descarga segura de las mercancías.*
2. *En particular, se cumplirán las siguientes normas:*
 - a) ***Cuando la naturaleza de la materia lo requiera, se derivará a tierra la masa metálica de la cisterna.***
 - b) *Se evitarán desbordamientos o emanaciones peligrosas que pudieran producirse.*
 - c) *Se vigilarán las tensiones mecánicas de las conexiones al ir descendiendo o elevándose la cisterna.*
 - d) *No se emitirán a la atmósfera concentraciones de materias superiores a las admitidas por la legislación correspondiente.*
 - e) *Cada planta tendrá unas instrucciones específicas, respecto a otras condiciones de la operación de cada mercancía que se carga o descarga, cuando sean distintas a las normas generales.*
 - f) *El vehículo deberá estar inmovilizado y con el motor parado durante toda la operación de carga o descarga, excepto cuando su funcionamiento sea necesario para realizar tales operaciones. El cargador de cisternas comprobará, con suficiente garantía, el peso o volumen cargado y el grado de llenado.*
3. *En caso que, previamente a la descarga, sea considerada necesaria una toma de muestras del producto transportado, esta operación será realizada por el descargador, tanto si la muestra es tomada por la parte superior como por la parte inferior de la cisterna.*

²⁸ Acuerdo europeo de transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera.

5.9. Normativa técnica

- *Norma EN 61340-5-1:2007.- Electrostática. Parte 5-1: Protección de componentes electrónicos frente al fenómeno electrostático. Requisitos generales.*

Esta norma establece ciertos requisitos técnicos y organizativos que se deben tener en cuenta para la planificación de un programa de control de la electricidad estática en procesos de fabricación de componentes electrónicos; especifica los requisitos técnicos necesarios para el diseño, uso y control de un área protegida electrostática (EPA) para que los dispositivos sensibles a descargas electrostáticas con sensibilidad de 100 V (modelo del cuerpo humano) o superior se puedan manipular en el área EPA con un riesgo mínimo de daños a los productos; entre los requisitos técnicos que contempla la norma se encuentra los siguientes:

- Sistemas de puesta a tierra de equipos, instalaciones y mobiliario
 - Puesta a tierra del personal
 - Capacitación del personal
 - Verificación del cumplimiento de la norma (prueba , medición y auditoría)
 - Sistema de embalaje de protección ESD, incluido el marcado
- *Norma UNE-EN 61340-5-2:2002.- Electrostática. Parte 5-2: Protección de componentes electrónicos frente al fenómeno electrostático. Guía de aplicación.*

Esta norma ofrece una serie de soluciones técnicas (señalización, marcado, equipos de trabajo y de protección, manipulación de producto terminado) para la aplicación de la norma EN 61340-5-1:2007.

- *Informe UNE 109100:1990 IN.- Control de la electricidad estática en atmósferas inflamables. Procedimientos prácticos de operación. Carga y descarga de vehículo-cisterna, contenedores-cisterna y vagones-cisterna.*

Este informe técnico proporciona algunas recomendaciones para controlar los riesgos derivados de la electricidad estática en operaciones de carga y descarga de líquidos en vehículo-cisterna, contenedores-cisterna y vagones-cisterna destinados al transporte de productos que pueden generar mezclas inflamables con el aire en las condiciones de operación (es decir, en condiciones ambientales).

- *Informe UNE 109101-1:1995 IN.- Control de la electricidad estática en el llenado y vaciado de recipientes. Parte 1: recipientes móviles para líquidos inflamables.*

Este informe técnico define las precauciones y medidas de seguridad a aplicar en las operaciones de llenado y vaciado de líquidos *inflamables* en recipientes

móviles de capacidad hasta 3000 litros, que puedan generar *atmósferas inflamables* en las condiciones de operación (es decir, en condiciones ambientales), tanto en procesos de fabricación como en almacenamientos.

- *Informe UNE 109101-2:1995 IN.- Control de la electricidad estática en el llenado y vaciado de recipientes. Parte 2: carga de productos sólidos a granel en recipientes que contienen líquidos inflamables.*

Este informe técnico define las precauciones y medidas de seguridad a aplicar en la carga de materiales sólidos a granel en recipientes que contienen líquidos *inflamables* que puedan generar mezclas *inflamables* en las condiciones de operación, circunstancia que se suele dar en procesos industriales de mecanizado de piezas y también en la fabricación de productos químicos.

- *Informe UNE 109104:1990 IN.- Control de la electricidad estática en atmósferas inflamables. Tratamiento de superficies metálicas mediante chorro abrasivo. Procedimientos prácticos de operación.*

Este informe técnico ofrece pautas para la identificación de los riesgos de inflamación que pueden derivarse del tratamiento de superficies metálicas mediante chorro de material abrasivo cuando se someten a este proceso instalaciones en servicio a través de las cuales se manipulan líquidos *inflamables*; también proporciona una serie de recomendaciones sobre procedimientos operativos para reducir los citados riesgos.

- *Norma UNE 109108-1:1995.- Almacenamiento de productos químicos. Control de electricidad estática. Parte 1: pinza de puesta a tierra. Norma UNE 109108-2:1995.- Almacenamiento de productos químicos. Control de la electricidad estática. Parte 2: borna de puesta a tierra.*

Estas normas definen las características y formulan ciertas recomendaciones para la conservación de dos piezas clave (pinza y borna de puesta a tierra) que se deben utilizar para la descarga de la electricidad estática generada en operaciones de carga y descarga de productos químicos *inflamables*.

- *Informe CLC/TR 50404:2003. Electrostatics - Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity.*

Este informe técnico, destinado a fabricantes y diseñadores de procesos industriales, proporciona información sobre las características que deben cumplir los productos y los procesos para evitar o controlar los riesgos de origen electrostático. Se puede utilizar para la evaluación del riesgo electrostático o para la preparación de normas CEN sobre máquinas.

6. EVALUACIÓN DEL RIESGO

La evaluación del riesgo debido a las descargas electrostáticas se deberá efectuar siguiendo las directrices establecidas en el artículo 4 del Real Decreto 681/2003 sobre protección de los trabajadores frente a los riesgos de *atmósferas explosivas* (véase el punto 5.3 de este documento):

“1. En cumplimiento de las obligaciones establecidas en los artículos 16 y 23 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales y en la sección 1.ª del capítulo II del Reglamento de los Servicios de Prevención, el empresario evaluará los riesgos específicos derivados de las atmósferas explosivas, teniendo en cuenta, al menos:

- a) La probabilidad de formación y la duración de atmósferas explosivas.*
- b) La probabilidad de la presencia y activación de focos de ignición, **incluidas las descargas electrostáticas.***
- c) Las instalaciones, las sustancias empleadas, los procesos industriales y sus posibles interacciones.*
- d) Las proporciones de los efectos previsibles...”*

Es decir: después de comprobar que no se podrá evitar la presencia de *sustancias inflamables* ni su dispersión en el aire en cantidades peligrosas, se deberá evaluar cualquier fuente de ignición que pueda aparecer en las áreas donde puedan formarse *atmósferas explosivas*. En especial, se deberán evaluar las actividades que se realizan en las áreas de riesgo y los equipos que en estas intervienen²⁹, incluso el uso de herramientas manuales. Las descargas electrostáticas pueden darse tanto por las condiciones de desarrollo del proceso como por carga acumulada por los trabajadores, por ello tendrán que evaluarse todas las circunstancias en las que puedan producirse dichas descargas electrostáticas³⁰.

La evaluación de riesgos deberá contemplar todas las actividades que se realicen en la empresa, tanto las actividades rutinarias de proceso como las actividades periódicas o puntuales (limpieza, mantenimiento, revisiones, etc.); se contemplarán todas las fases de la actividad: arranque, régimen normal de trabajo, parada, disfuncionamientos previsibles, así como posibles errores de manipulación.

²⁹ Véase el Apéndice 4. Equipos para uso en atmósferas explosivas de la Guía Técnica del INSHT para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

³⁰ Véanse los capítulos 2 y 3 de este documento y el Apéndice 5. Fuentes de ignición. Electricidad estática de la Guía Técnica del INSHT para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

La evaluación debe ser global, valorando en su conjunto los equipos existentes, las características de construcción de los mismos, las materias utilizadas, las condiciones de trabajo y los procedimientos así como las posibles interacciones de estos elementos entre sí y con el entorno de trabajo.

En la figura 23 se muestra un ejemplo de esquema de trabajo que puede servir para efectuar la evaluación y control del riesgo de ignición debido a la electricidad estática.

Para la realización de la evaluación de riesgos también se deberán tener en cuenta las disposiciones específicas establecidas en el Real Decreto 486/1997 (véase el punto 5.2 de este documento).

7. MEDIDAS PREVENTIVAS Y DE PROTECCIÓN

Al igual que con cualquier otro riesgo, el establecimiento de las medidas de prevención y protección frente al riesgo derivado de las descargas electrostáticas en los centros de trabajo pasa por seguir lo establecido en el artículo 15.1 de la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales:

“1. El empresario aplicará las medidas que integran el deber general de prevención [...], con arreglo a los siguientes principios generales:

- a Evitar los riesgos*
- b. Evaluar los riesgos que no se puedan evitar*
- c. Combatir los riesgos en su origen*
- d. Adaptar el trabajo a la persona, en particular en lo que respecta a la concepción de los puestos de trabajo, así como a la elección de los equipos y los métodos de trabajo y de producción, con miras, en particular, a atenuar el trabajo monótono y repetitivo y a reducir los efectos del mismo en la salud*
- e. Tener en cuenta la evolución de la técnica*
- f. Sustituir lo peligroso por lo que entrañe poco o ningún peligro*
- g. Planificar la prevención, buscando un conjunto coherente que integre en ella la técnica, la organización del trabajo, las condiciones de trabajo, las relaciones sociales y la influencia de los factores ambientales en el trabajo*
- h. Adoptar medidas que antepongan la protección colectiva a la individual*
- i. Dar las debidas instrucciones a los trabajadores”.*

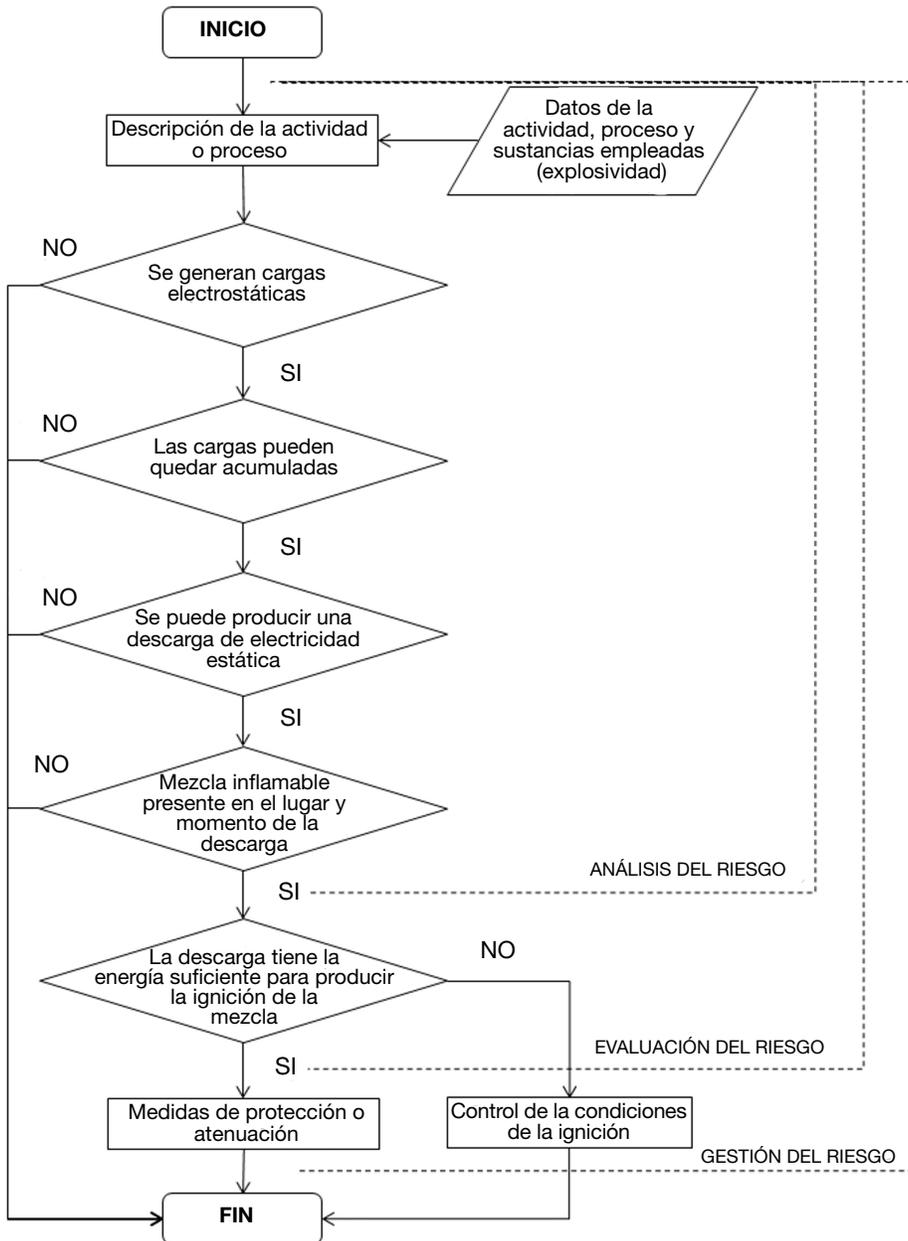


Figura 23. Evaluación y control de la electricidad estática como fuente de ignición: diagrama de decisiones

Como ya se ha expuesto anteriormente, las descargas electrostáticas constituyen un riesgo para la seguridad y salud de los trabajadores principalmente si pueden ser focos de ignición efectivos en presencia de una *atmósfera inflamable*; por lo tanto, siguiendo el citado principio legal, se deberá actuar de la siguiente manera:

1º Análisis del riesgo: evitar la formación de mezclas explosivas. Esta medida suele ser difícil de aplicar, ya que a menudo el proceso productivo depende esencialmente de la manipulación de sustancias combustibles o *inflamables*, ya sean como materias primas, productos intermedios o productos finales, con capacidad para dispersarse en el aire.

2º Evaluar el riesgo. Se estudiará si se pueden generar *atmósferas inflamables* en zonas en las que se puedan producir descargas electrostáticas (véanse los capítulos 3 y 6 de este documento). En caso afirmativo, se deberán valorar las concentraciones de *atmósfera inflamable* según las condiciones del proceso y comprobar si tales concentraciones originan un riesgo en su proximidad y en las condiciones presentes de trabajo.

3º Combatir los riesgos en su origen. Se deberá establecer un mecanismo mediante el cual todas las cargas electrostáticas acumuladas se puedan recombinar antes de que provoquen chispas peligrosas. Existen diversas medidas para la eliminación de las cargas electrostáticas acumuladas, pero no son aplicables todas ellas en todos los casos.

A continuación se exponen algunas de las medidas que se aplican con mayor frecuencia para el control de la electricidad estática; la aplicabilidad de cada medida a un determinado proceso o actividad dependerá del mecanismo particular de generación y acumulación de cargas que tenga lugar; en el capítulo 8 de este documento se describen algunas aplicaciones prácticas de estas medidas.

A. Medidas preventivas

Medidas técnicas

- Control de las mezclas explosivas, mediante:
 - Sustitución de los productos peligrosos por otros inocuos o con una peligrosidad más baja.
 - Control riguroso de la carga y el vaciado de recipientes con líquidos y sólidos pulverulentos, evitando simultáneamente la entrada incontrolada de aire. En el caso de sólidos se recomienda el empleo de válvulas de doble compuerta correctamente dimensionadas o el empleo de alimentadores de tornillo, también del tamaño adecuado.

- Reducción de la concentración de oxígeno (inertización) dentro de los recipientes que han contenido sustancias inflamables; esta medida está especialmente indicada en los casos en los que haya que efectuar trabajos en caliente en el interior de los recipientes (por ejemplo, soldadura o corte de chapa).
- Control de la ignición, mediante:
 - Conexiones equipotenciales y a tierra.
 - Control de la humedad ambiental.
 - Aumento de la conductividad de los materiales.
 - Aumento de la conductividad del aire (ionización).
 - Control de velocidades en los procesos.
 - Empleo de materiales o productos con propiedades conductoras o antiestáticas.
 - Empleo de suelos de material disipativo.
 - Empleo de calzado y ropa antiestáticos.
 - Control de las descargas electrostáticas de las personas.
 - Marcado de equipos.

Medidas organizativas:

- Formación e información de los trabajadores.
- Instrucciones y permisos de trabajo.
- Cualificación de los trabajadores.
- Control de las condiciones de trabajo (vigilancia, mantenimiento, etc.).
- Señalización de zonas.

B. Medidas de protección

Atenuar los efectos de la ignición:

- Instalaciones y equipos resistentes a la explosión.
- Sistemas de alivio de presión.
- Supresión de la explosión.

Limitar la propagación de la explosión:

- Detección de frentes de llama.

- Extinción de llamas.
- Desviación de la explosión.

7.1. Puesta a tierra y conexión equipotencial de todas las superficies conductoras³¹

La puesta común a tierra de todas las superficies conductoras de un proceso productivo es una medida esencial y a menudo suficiente para disipar con eficacia las cargas electrostáticas acumuladas, especialmente si los elementos conductores cargados pueden quedar aislados de tierra. Para que esta medida sea eficaz, se debería verificar que, como criterio general, la *resistencia eléctrica a tierra* de todas las superficies conductoras no superase el megaohmio ($10^6 \Omega$) en las condiciones más desfavorables. Si no hay mecanismos de generación de grandes cargas electrostáticas, se podría admitir una *resistencia a tierra* de hasta $10^8 \Omega$ en condiciones de *humedad relativa* baja o con formación lenta de capas aislantes.

Así mismo, la *resistencia volumétrica* total del calzado y la resistencia de fuga a tierra no deben superar los $10^8 \Omega$ (véase el punto 7.8).

Para aplicar esta medida preventiva se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La conexión equipotencial evita la posible existencia de diferencias de potencial entre elementos conductores.
- Las tuberías enterradas y los tanques de almacenamiento apoyados sobre el terreno se pueden considerar puestos a tierra debido a su propia configuración.
- Si el suelo es algo conductor y los recipientes son metálicos, no es necesario instalar un conductor específico para la puesta a tierra.
- Sobre las superficies conductoras no debe haber suciedad, pintura ni recubrimientos aislantes de ninguna clase que interrumpan la continuidad del camino a tierra. Si así fuera, se deberían instalar las conexiones sobre metal a la vista y un conductor de puesta a tierra conectado a una toma de tierra prevista para este fin.
- Se considera que una resistencia a tierra de unos pocos ohmios es suficiente para disipar eficazmente las cargas acumuladas.
- La puesta a tierra se puede realizar a través de elementos estructurales cercanos que estén anclados en el suelo.

³¹ NTP-567. Protección frente a cargas electrostáticas. INSHT, 2000. NTP-828. Electricidad estática en polvos combustibles (II): medidas de seguridad. INSHT, 2010.

- La puesta a tierra de elementos aislantes no sirve para disipar las cargas, ya que aquellos no ofrecen un camino efectivo para ello. De hecho, sólo se pueden utilizar si se justifica que no pueden causar descargas en forma de abanico propagante.
- Es esencial garantizar la continuidad en las conexiones equipotenciales de equipos de bombeo, tuberías y recipientes bajo el principio de redundancia. Es frecuente encontrar tuberías flexibles normalizadas con el alma metálica en sus extremos sin conectar, olvidarse de la conexión conductora con pinzas normalizadas (véase la figura 33), conectar las pinzas en bocas de recipientes u otros lugares incorrectos o que no garantizan la puesta a tierra, emplear bombas de trasvase inadecuadas, etc.

7.2. Control de la humedad ambiental

El límite inferior reglamentario establecido para la *humedad relativa* en los centros de trabajo cuando existe riesgo por descargas electrostáticas es el 50% (véase el punto 5.2 de este documento). No obstante, cuando se deba controlar la acumulación de electricidad estática de forma muy rigurosa, se recomienda intentar alcanzar el 60%, pues en estas condiciones el aire se comporta como conductor para disipar las cargas acumuladas (véase el punto 7.3). Esta medida puede ser muy útil, por ejemplo, en la industria del embalaje, imprenta, papel, plásticos, textil, electrónica, automovilística, farmacéutica, pirotécnica, etc., no sólo para evitar descargas peligrosas sino por razones productivas.

Sin embargo, esta medida puede no ser aplicable en el caso de trabajar con *polvos* alimentarios, ya que el exceso de humedad facilita la proliferación de bacterias, hongos u otros agentes que pueden contaminar o apelmazar el producto hasta llegar incluso a su inutilización. Tampoco es eficaz cuando se manipulan *materiales hidrófobos*, como, por ejemplo, el polietileno.

7.3. Aumento de la conductividad de los materiales

7.3.1. Mediante el aumento de la *humedad relativa del aire* (véanse los puntos 3.3 y 7.2 y la referencia legal 5.2 de este documento)

Se considera que un aire con una *humedad relativa* que alcance el 60% es capaz de generar sobre los materiales una película conductora superficial con suficiente capacidad de disipación (véase la figura 24). Esto se consigue con dispositivos de humidificación del aire que estén, preferiblemente, integrados en el sistema general de climatización del edificio.

Esta solución técnica presenta ciertas limitaciones:

- Si el aire contiene poco vapor de agua (propio del invierno), es difícil conseguir el nivel de humedad citado.
- La eficacia del sistema es muy reducida si se aplica a maquinaria con velocidades de trabajo elevadas, ya que no hay tiempo suficiente para que se genere la película conductora sobre los materiales.
- No sirve con ciertos materiales plásticos ni con líquidos derivados del petróleo, ya que son aislantes y, además, no pueden absorber la humedad del aire.

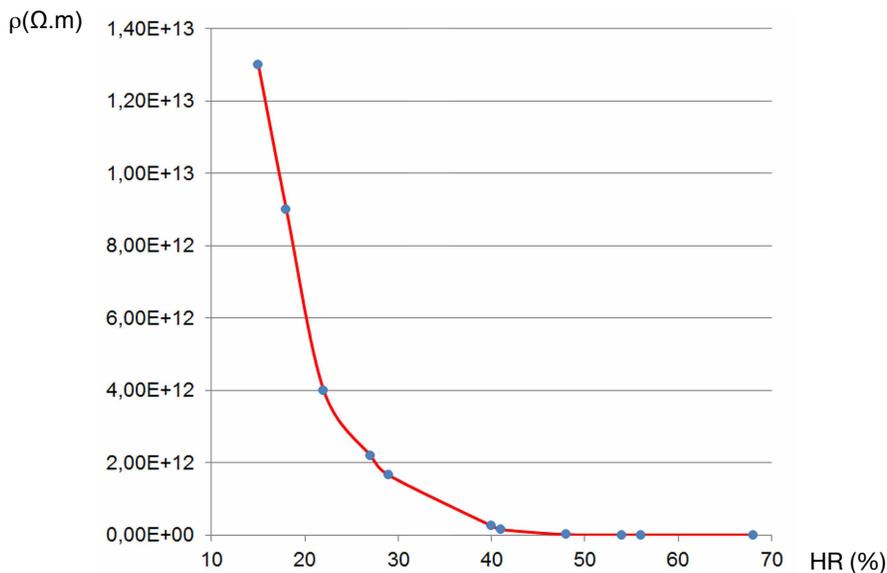


Figura 24. Influencia de la humedad relativa del aire en la resistividad volumétrica del azúcar en polvo (granulometría media: 22 μm)³²

7.3.2 Mediante el empleo de aditivos

La adición de una pequeña cantidad de un cierto aditivo a un material puede producir una reducción de su *resistencia volumétrica*, es decir, un aumento de su *conductividad eléctrica* suficiente para que se convierta en un material que disipe eficazmente las cargas electrostáticas acumuladas en su seno.

³² "Dust explosions: how should the influence of humidity be taken into account?" M. Traoré, O. Dufaud, L. Perrin, S. Chazelet, D. Thomas. CNRS, 2009.

Existen numerosos ejemplos de esta solución técnica:

- Adición de negro de humo a la goma de neumáticos, mangueras y cintas transportadoras.
- Adición de carbono, grafito y otros productos conductores para reducir la resistencia eléctrica de asfaltos y suelos sintéticos donde exista riesgo de explosión.

Se debe advertir que estos materiales tratados pueden perder su eficacia disipadora con el tiempo por descomposición física o química o por rotura de la continuidad de las partículas conductoras. Siempre que sea posible, el uso de esta medida se debe acompañar de la puesta a tierra con conexión equipotencial de los elementos conductores (véase el punto 7.1 de este documento).

7.3.3. Mediante tratamiento superficial

El tratamiento superficial se realiza generalmente mediante la aplicación de preparados o mezclas antiestáticos, añadidos a los detergentes, pinturas, lubricantes, impregnantes y otras sustancias, para aumentar la *conductividad superficial* de los materiales y favorecer la formación de una capa higroscópica conductora. En esta clase de medidas se incluye el pintado y pulverizado de cintas, correas o suelos con una mezcla al 50% de agua y glicerina. Se pueden utilizar productos comerciales antiestáticos, en disolución con agua y su aplicación a suelos sintéticos aislantes, por fregado suave con un paño antiestático humedecido con la disolución. Las capas creadas de esta forma son solubles en agua y se deterioran con el uso, por lo que se debe realizar un tratamiento periódico.

7.4. Aumento de la conductividad del aire

La *conductividad eléctrica* del aire se puede aumentar mediante el empleo de **ionizadores de aire**. La ionización del aire es uno de los métodos más eficaces para eliminar las cargas electrostáticas acumuladas en materiales aislantes y en conductores aislados. Los ionizadores de aire generan grandes cantidades de *iones* positivos y negativos en el aire circundante, que actúan como portadores móviles de carga eléctrica. Mientras circulan por el aire, los *iones* se ven atraídos por las partículas con cargas opuestas que están en las superficies de los materiales; así, se neutralizan

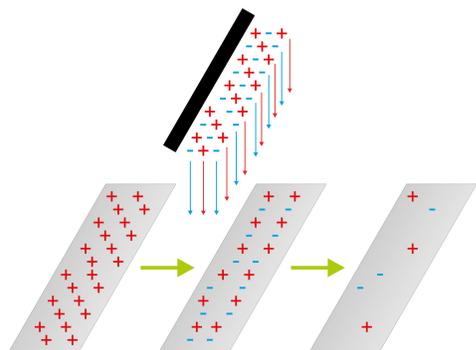


Figura 25. Ionizador de aire

rápidamente las superficies cargadas electrostáticamente. La ionización del aire puede lograrse mediante ionizadores eléctricos, que generan *iones* en un proceso que se conoce como “efecto corona”. En este proceso, los ionizadores eléctricos generan *iones* aumentando la intensidad de un *campo eléctrico* alrededor de un elemento puntiagudo hasta que se rebasa la *rigidez dieléctrica del aire* (véase el capítulo 3 de este documento). Cuando los *electrones* fluyen del electrodo al aire se produce una corona negativa, mientras que la corona positiva se produce cuando los *electrones* fluyen de las moléculas de aire al electrodo. En ambos casos, se produce una recombinación y anulación de las cargas acumuladas en la superficie a tratar y, por tanto, la eliminación del riesgo de descargas.

La tecnología de los ionizadores de aire es muy variada; dependiendo de la aplicación, se pueden encontrar:

a. *Ionizadores emisores de radiaciones ionizantes (véase la figura 26):*

Para la ionización del aire con radiaciones ionizantes se pueden utilizar rayos ultravioleta, X, α , β y γ ; los más efectivos para la eliminación de cargas electrostáticas superficiales o espaciales son los rayos α y β . Para conseguir los mejores resultados se requieren fuentes de cierta potencia, especialmente cuando hay elementos móviles susceptibles de cargarse y que se mueven a velocidades elevadas. La fabricación y distribución de neutralizadores radiactivos requiere la homologación por parte del Consejo de Seguridad Nuclear³³.



Figura 26. Ionizador de aire mediante radiaciones ionizantes³⁴

³³ Véase el RD 1836/1999, por el que se aprueba el reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, anexos I y II.

³⁴ La imagen del equipo es cortesía de electrostatica.net.

b. *Neutralizadores de electrodos de alta tensión (véase la figura 27):*

Estos equipos ionizan el aire próximo mediante descargas de tipo corona en puntas, alambres, hojas o bordes sometidos a *campos eléctricos* intensos; estos campos se pueden crear con un transformador que eleve la tensión a unos 5-10 kV, al que se conecta una varilla aislada con dos electrodos: uno conectado a alta tensión y el otro al potencial de tierra. El electrodo de alta tensión está formado por una fila de elementos puntiagudos o alambres delgados. Estos elementos se colocan a unos pocos centímetros y paralelos al objeto que se quiere neutralizar. Son un medio efectivo para eliminar las cargas electrostáticas en procesos de recubrimiento y laminación, por lo que se utilizan principalmente en la industria textil, papelera, gráfica, etc.

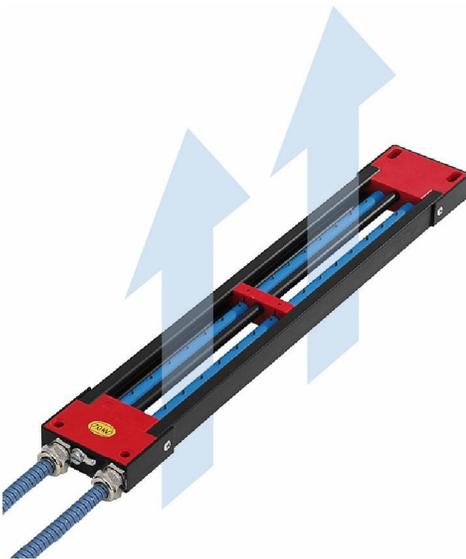


Figura 27. Neutralizador de electrodos de alta tensión³⁵

Estos equipos no se deben instalar en emplazamientos con *atmósferas explosivas* (especialmente en zonas 0 o 20), salvo en el caso en que estén certificados para tal fin o se aplique una ventilación externa que elimine las concentraciones peligrosas de *sustancias inflamables* en el entorno del equipo.

c. *Ionizadores de electrodos puntiagudos conectados a tierra (eliminador inductivo o neutralizador estático):*

Estos dispositivos pasivos también se basan en la ionización del aire por efecto corona, pero son efectivos únicamente para campos estáticos elevados. Su principio de funcionamiento es el siguiente: una carga electrostática tiene libertad de movimiento en un cuerpo conductor y en un cuerpo esférico

en el espacio se distribuye uniformemente sobre su superficie. Si el cuerpo no es esférico, la autorrepulsión de las cargas hará que se concentren sobre las superficies de menor radio de curvatura (es decir, las más puntiagudas). Si el cuerpo está rodeado de aire u otro gas y el radio de curvatura se reduce mucho, la elevada concentración de carga en la punta puede producir la ionización del aire, haciéndolo conductor. La carga sobre el neutralizador es originada por inducción desde el cuerpo que sufre la generación de cargas. Este sistema es

³⁵ La imagen del equipo es cortesía de electrostatica.net.

muy efectivo en la fabricación de láminas o papeles aislantes: se suele colocar un eliminador inductivo en la proximidad de la lámina y otro en la proximidad de rodillos recubiertos de goma.

El neutralizador inductivo debe estar conectado a tierra, de modo que las cargas procedentes del cuerpo cargado fluyan a través del dispositivo hacia tierra. No se necesita ninguna fuente de energía para funcionar, pero no sirven si el campo electrostático es pequeño. Estos neutralizadores se suelen situar a unos 10 a 20 mm de la superficie a descargar (véase la figura 28): más lejos no serían efectivos y más cerca podrían interferir en el proceso productivo. Este sistema se considera una buena solución para uso en ambientes con *atmósferas explosivas*, ya que la neutralización de las cargas suele suceder antes de que se alcancen las condiciones para que una posible chispa alcance la energía mínima de inflamación de la *atmósfera explosiva*.

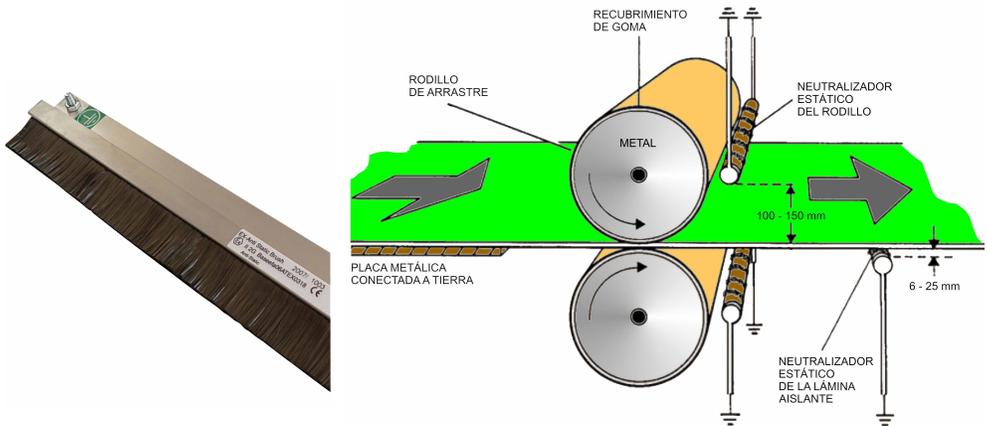


Figura 28. Eliminador inductivo³⁶

d. Ionizadores de llama abierta (de gas):

Estos dispositivos se utilizan principalmente en los sistemas de impresión de las industrias de artes gráficas. Sólo se puede emplear si se utilizan tintas de baja volatilidad. El quemador debe estar enclavado con la prensa, de forma que se corte el paso de gas y se apague la llama cuando se pare la prensa.

7.5. Reducción de la velocidad relativa entre superficies en rozamiento

Cuanto menor sea la velocidad relativa entre dos superficies, el calentamiento por rozamiento será menor y, por tanto, también se reducirá la excitación atómica de

³⁶ La imagen del equipo es cortesía de electrostatica.net.

los materiales y su capacidad de cesión o admisión de carga electrostática. Esta medida está condicionada al ritmo de producción que se desee mantener.

7.6. Empleo de materiales o productos con propiedades conductoras o antiestáticas

Se pueden utilizar aditivos en la formulación de plásticos, consiguiendo resistencias superficiales entre 10^3 y $10^4 \Omega$ con los primeros (negro de carbón, grafito, etc.) y $10^8 \Omega$ con los segundos (ésteres de ácidos grasos, estearato de glicerol, etc.). Sin embargo, estos aditivos no se añaden normalmente cuando se manipulan en forma de gránulos. Algunos aditivos también son aptos para la industria alimentaria si cumplen ciertos requisitos exigidos en la normativa aplicable.

7.7. Control de la velocidad de paso de materiales por conductos y cintas

Una reducción de la velocidad de circulación de los materiales reducirá consiguientemente el ritmo de generación de electricidad estática.

Esta medida es aplicable a procesos como la producción de películas plásticas por extrusión, el movimiento de materiales sobre cintas transportadoras o el flujo de líquidos por el interior de tuberías. Por ejemplo: para el caso de líquidos de una sola fase (sin discontinuidades), se pueden seguir las recomendaciones recogidas en la tabla 7.

Tabla 7
Control de las velocidades de paso en líquidos³⁷

Conductividad del líquido (pS/m) ⁽¹⁾	v.d ⁽²⁾ (m ² /s)	Límite absoluto para todos los casos
< 5	< 0,38	v < 7 m/s
> 5	< 0,5	

(1) pS = picosiemens = 10^{-9} siemens

(2) v = velocidad del fluido en el interior del conducto (m/s); d = diámetro interior del conducto (m)

³⁷ Informe CLC/TR 50404:2003. *Electrostatics. Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity* (sustituye a BS-5958-2. *Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity*). CENELEC.

Informe UNE 109-100:1990. Control de la electricidad estática en atmósferas inflamables. Procedimientos prácticos de operación. Carga y descarga de líquidos en vehículos-cisterna, contenedores-cisterna y vagones-cisterna.

Se puede reducir la velocidad aumentando el diámetro de las tuberías y, a su vez, reduciendo la *resistencia a tierra*, con lo que se facilita el drenaje de las cargas que se van generando.

La dificultad principal en la aplicación de esta medida es el ritmo de producción exigido al proceso, que puede ser incompatible con una reducción de las velocidades de paso de los fluidos.

7.8. Empleo de suelos de material disipativo (no aislante)

De acuerdo con el requisito legal recogido en el punto 5.7 de este documento, cuando se quiera evitar el riesgo de ignición también se deberán tener en cuenta las descargas electrostáticas producidas por los trabajadores o el entorno de trabajo como portadores o generadores de carga; para evitar que el trabajador adquiera carga simplemente caminando, una medida preventiva muy eficaz consiste en la utilización de suelos con características disipativas. Para ello, existen diversas soluciones técnicas:

- a. Someter los suelos a un tratamiento superficial para aumentar su *conductividad*; por ejemplo: agregando una capa de agua y glicerina al 50% con un paño antiestático (véase el punto 7.3.3 de este documento).
- b. Utilizar suelos sintéticos especiales fabricados con una *conductividad eléctrica* determinada; los llamados “suelos técnicos” (véase la figura 29)³⁸.

Para más información, consúltese el apéndice “Fuentes de ignición. Electricidad estática” de la Guía Técnica del INSHT para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de *atmósferas explosivas* en el lugar de trabajo³⁹.

7.9. Empleo de calzado y ropa antiestáticos⁴⁰

Tal y como se ha expuesto anteriormente, el simple movimiento de un trabajador en el espacio de trabajo puede generar cargas electrostáticas y estas pueden quedar acumuladas en él hasta que encuentren un camino de disipación efectivo. Si estas cargas acumuladas se disipan en forma de chispa y la energía puesta en juego tiene una magnitud suficiente, puede constituir un foco de ignición efectivo en determinadas situaciones.

³⁸ Véase la norma UNE-EN 13329:2007+A1:2009. Revestimientos de suelo laminados. Elementos con capa superficial basada en resinas aminoplásticas termoestables. Especificaciones, requisitos y métodos de ensayo. AENOR.

³⁹ Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. INSHT, 2008.

⁴⁰ NTP-887. Calzado y ropa de protección “antiestáticos”. INSHT, 2010.

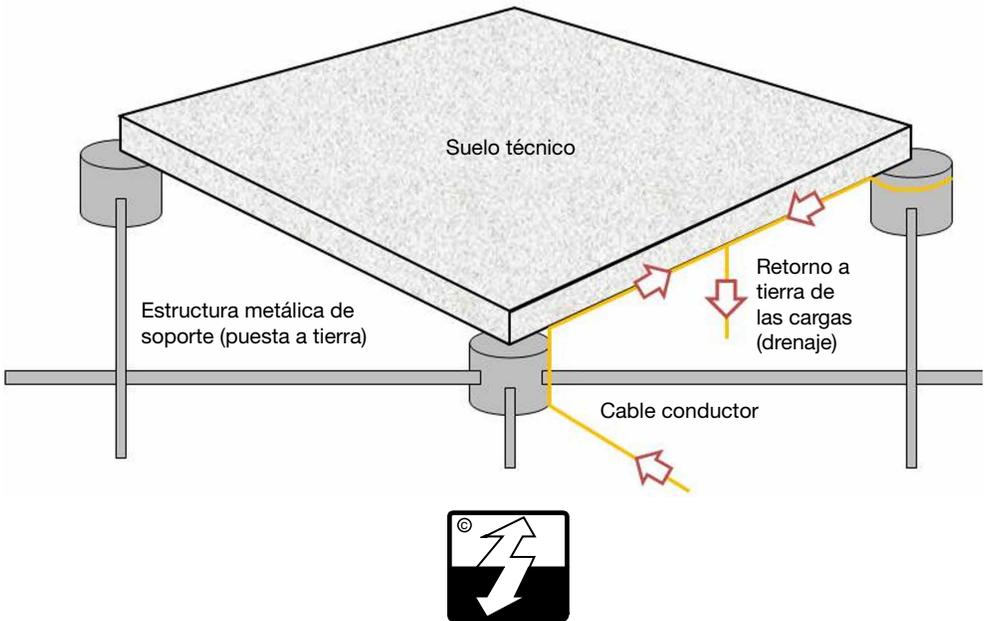


Figura 29. Suelos técnicos: funcionamiento y marcado normativo

El Real Decreto 681/2003 establece que, para evitar descargas electrostáticas peligrosas procedentes de trabajadores, estos dispongan de calzado antiestático y ropa de trabajo adecuada (véase el punto 5.3 de este documento). Este requisito se complementa con lo establecido en la exigencia 2.6 del anexo II del Real Decreto 1407/1992, por el que se regulan las condiciones para la comercialización y libre circulación intracomunitaria de los equipos de protección individual (véase el punto 5.6 de este documento).

También es esencial que el suelo sobre el que pisa el trabajador tenga un nivel de *conductividad* adecuado, es decir, ciertas propiedades disipativas, de modo que el **camino** de las cargas a tierra oponga la menor resistencia posible y sea capaz de drenarlas en un tiempo razonablemente corto.

En resumen, es esencial que se verifique la siguiente condición:

Calzado “conductor” + Suelo “conductor” → Puesta a tierra segura

La bibliografía existente a este respecto recomienda una resistencia máxima del conjunto calzado/suelo de $10^9 \Omega$. Este nivel de resistencia, combinado con la capacidad eléctrica típica del cuerpo humano, proporciona tiempos de descargas del orden de

0,06 segundos. Para conseguir este propósito, el trabajador deberá llevar calzado denominado **antiestático** o **disipativo**, cuyos límites de resistencia normativos son 10^9 y $10^5 \Omega$. Este tipo de calzado también puede proteger al trabajador frente a contactos eléctricos fortuitos con equipos o instalaciones eléctricas de hasta 250 V de tensión nominal (corriente alterna). Esta solución es la más práctica y adecuada para la gran mayoría de los casos; no obstante, en determinadas operaciones de especial riesgo, tales como el trasiego de *sustancias inflamables* con una EMI muy baja o la manipulación de explosivos, es posible que el calzado disipativo no ofrezca una eficacia suficiente; en estos casos lo prioritario es conseguir un drenaje de las cargas acumuladas en el menor tiempo posible. Para esto existe el **calzado conductor**, que debe tener como máximo una resistencia de $10^5 \Omega$. Debe tenerse en cuenta que este calzado no debe llevarse cuando exista riesgo de contacto eléctrico accidental y no es adecuado para uso general.

En cuanto a la **ropa**, también puede cargarse electrostáticamente, con independencia de que el trabajador esté puesto a tierra; las descargas electrostáticas desde la ropa o desde otros equipos de protección que lleve el trabajador son posibles y deben tenerse en consideración para la selección, en su caso, de ropa y equipos disipativos. Se deberán tener en cuenta casos de especial peligrosidad, como, por ejemplo, al trabajar con gases muy sensibles a la ignición – grupo IIC – o en procesos que generen mucha carga.

En estos casos, se podrá emplear ropa de protección con las siguientes características⁴¹:

- *Resistencia superficial* menor o igual a $2,5 \cdot 10^9 \Omega$ en, al menos, una de las superficies (para prendas multicapa).
- Un *tiempo de semi-disipación* menor de 4 s.
- El marcado deberá incluir un pictograma específico (véase la figura 30), que denota las características antiestáticas de la ropa.

7.10. Reducción de la concentración de oxígeno (inertización)

Toda mezcla de *sustancia inflamable* (gas, vapor, *polvo* o sus mezclas) en aire tiene una constante característica, denominada concentración límite de oxígeno (CLO), que es la concentración máxima de oxígeno (% v/v) que debe contener dicha mezcla por debajo de la cual la combustión no puede propagarse (véanse algunos ejemplos en la tabla 8). Por tanto, se pueden prevenir explosiones disminuyendo la

⁴¹ Véanse las normas UNE-EN 1149-1:2007. Ropas de protección. Propiedades electrostáticas. Parte 1: Método de ensayo para la medición de la resistividad de la superficie; y UNE-EN 1149-3:2004. Ropas de protección. Propiedades electrostáticas. Parte 3: Métodos de ensayo para determinar la disipación de la carga.

concentración de oxígeno, cualquiera que sea la concentración del combustible; este proceso se denomina **inertización**. Para reducir la concentración de oxígeno normalmente se sustituye parte del aire o todo él por nitrógeno, dióxido de carbono, gases nobles o vapor de agua, dependiendo de su disponibilidad y de su compatibilidad con el proceso y el entorno. Como criterio general, los compuestos orgánicos combustibles no propagarán la llama si el contenido de oxígeno en la mezcla compuesto + gas inerte + aire es inferior a 10,5 % y 13 % v/v con nitrógeno y dióxido de carbono respectivamente como gases inertes. No obstante, se recomienda adoptar un margen de seguridad de un 2 % a 3 % v/v para evitar concentraciones de oxígeno temporalmente altas en un punto determinado de la mezcla.

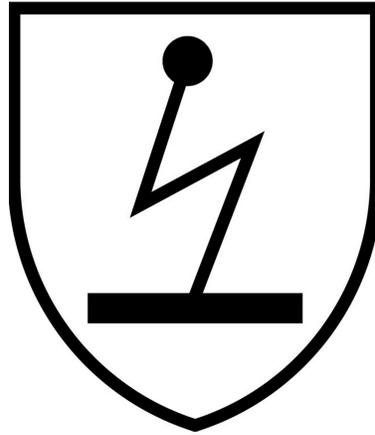


Figura 30. Ropa de protección antiestática. Pictograma normativo⁴²

Tabla 8
Concentración límite de oxígeno (CLO) de algunas mezclas simples⁴³

Sustancia	CLO (%)
Acetona	13,5
Disulfuro de carbono	5
Hidrógeno	5
Polvo de aluminio	5
Polvo de harina de guisantes	15

Obviamente, esta medida preventiva es incompatible con la presencia de trabajadores en el volumen afectado, por lo que se suele utilizar principalmente en canalizaciones y depósitos cerrados en los que no esté prevista la presencia humana, salvo para mantenimiento o reparaciones, procesos en los cuales el trabajador que

⁴² Norma UNE-EN 1149-5:2008. Ropas de protección. Propiedades electrostáticas. Parte 5: Requisitos de comportamiento de material y diseño.

⁴³ NTP-567. Protección frente a cargas electrostáticas.

ingrese en el espacio deberá adoptar las medidas preventivas y de protección correspondientes.

7.11. Instalación de elementos conductores de descargas electrostáticas de las personas

Cuando un trabajador debe realizar una operación con líquidos *inflamables*, se debe descargar de las posibles cargas que haya acumulado en su cuerpo; para ello, puede tocar una placa metálica conectada a tierra antes de entrar en el local donde vaya a realizar la operación.

A fin de evitar molestias o daños en la producción (industria electrónica), en locales con suelos de *material aislante*, se pueden colocar alfombrillas antiestáticas conectadas a tierra en la proximidad de máquinas con partes metálicas accesibles como medida complementaria a los aditivos añadidos a los productos de limpieza y la humidificación del ambiente.

7.12. Instalación de elementos no conductores de descargas electrostáticas de personas

Pueden producirse situaciones en que no se puede evitar la acumulación de cargas en lugares sin presencia de gases o vapores *inflamables* y, al mismo tiempo, no es factible establecer vías controladas de eliminación de cargas; en estos casos, se puede tratar de evitar totalmente la presencia de elementos conductores, empleando barandillas no metálicas, manillas aislantes de puertas, etc. Esta medida es válida únicamente para evitar molestias a los trabajadores por descargas electrostáticas incontroladas.

Esta medida es incompatible con la descrita en el punto 7.11.

7.13. Otros procedimientos

7.13.1. Elección adecuada de materiales en contacto

Esta medida consiste en evitar que entren en contacto materiales que tengan afinidades electrónicas muy diferentes (muy separados en la serie triboeléctrica). Es práctica siempre que se disponga de una gama amplia de materiales para elegir.

7.13.2. Reducción de la presión de contacto entre los materiales

Al aplicar esta medida se consigue reducir el área de contacto entre materiales, por lo que la transferencia de cargas entre ellos también se reduce.

8. APLICACIONES PRÁCTICAS

8.1. Trasvase de líquidos inflamables. Carga y descarga de camiones cisterna

En este apartado se presenta la problemática electrostática asociada al trasvase de líquidos *inflamables*, en particular desde y hacia camiones cisterna, así como algunas medidas preventivas y de protección que se pueden adoptar para controlar el riesgo de ignición.

La generación de cargas electrostáticas en el trasvase de líquidos *inflamables* se produce fundamentalmente por la separación mecánica de estos en contacto directo con la superficie sólida a través de la cual fluyen o sobre la cual se depositan o agitan.

La teoría de la “doble capa”

La circulación de un líquido por el interior de una tubería produce carga electrostática en ambos materiales, estableciéndose una capa de *iones* del líquido que se adhieren a la tubería y otra capa hacia el interior de la tubería en la que hay una dispersión de iones de signo opuesto (véase la figura 31). En algunos modelos actuales esta segunda capa se denomina “capa difusa” y se admite que el potencial electrostático en ella varía en función de la distancia a la pared de la tubería según la siguiente expresión:

$$V(x) = V_0 * e^{-\frac{x}{\delta}}$$

donde: $V(x)$ [V] = potencial electrostático de la “capa difusa”

V_0 [V] = potencial en la pared de la tubería

x [m] = distancia a la pared de la tubería

δ es un parámetro característico del líquido:

$$\delta = \left[\frac{\epsilon D}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}}$$

donde: ϵ [F/m] = permitividad eléctrica del líquido

D [m²/s] = coeficiente de difusión de los *iones* en el líquido

σ [S/m] = *conductividad eléctrica* del líquido

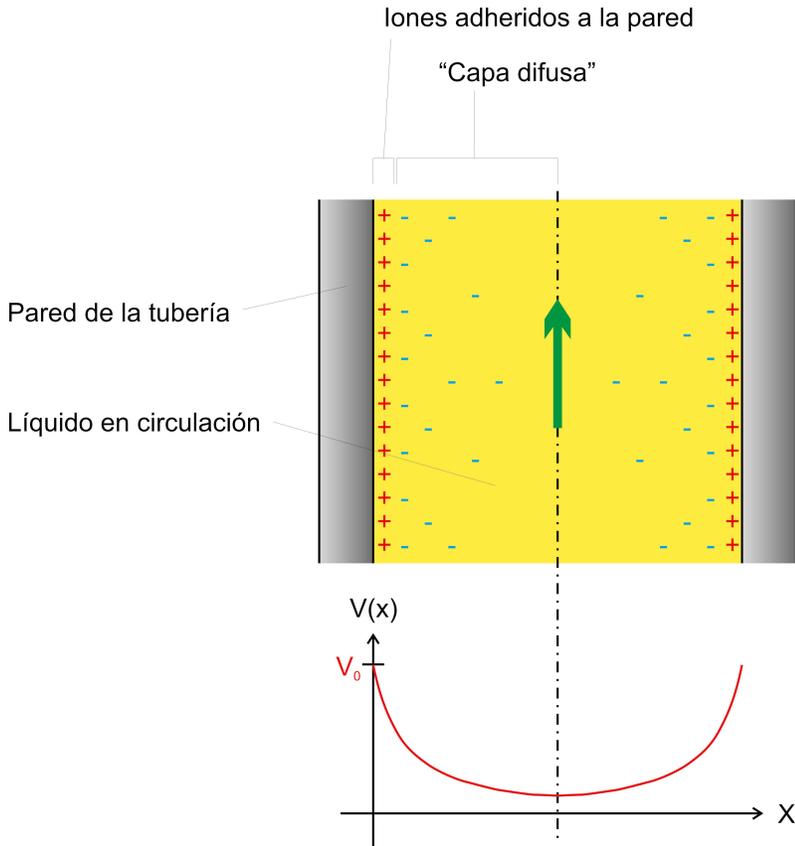


Figura 31. Circulación de líquidos en tuberías: distribución de las cargas y potencial electrostático generado (teoría de la “doble capa”)⁴⁴

La extensión espacial de la “capa difusa” en líquidos aislantes (por ejemplo, hidrocarburos) es de unos pocos milímetros, mientras que para líquidos conductores (por ejemplo, agua) es del orden de centésimas de micras. Esto explica por qué aparecen los fenómenos de electrificación sólo con líquidos aislantes.

Procesos en los que se generan cargas electrostáticas

Las cargas electrostáticas se generan con más facilidad durante alguno de los siguientes procesos⁴⁵:

⁴⁴ “Electricité statique”, Berger, N. [et al]. INRS, 2004.

⁴⁵ Véase el Informe UNE 109 101-1:1995 IN.

- Flujo de líquido por una canalización y, concretamente, a través de elementos de la instalación que aumentan la resistencia al paso del líquido (filtros, válvulas, bombas, recodos de tuberías, uniones embridadas, cambios en diámetros interiores, etc.).

Se debe prestar especial atención al paso por filtros con tamaño de malla inferior a 150 μm , pues, debido al elevado rozamiento que se produce la tasa de generación de cargas es más alta. En algunos casos, este hecho puede requerir el establecimiento de medidas preventivas más rigurosas como, por ejemplo, la adopción de *tiempos de relajación* de las cargas de hasta varios minutos. Sin embargo, se ha demostrado que para tamaños de malla superiores a 300 μm la probabilidad de formación de cargas en cantidades peligrosas es muy baja, por lo que será suficiente la adopción de tiempos de relajación de 30 segundos (véase la tabla 10).

- Salida de líquido proyectado a través de bocas de impulsión.
- Vertido de líquido en el interior de recipientes para su llenado, con el consiguiente movimiento sobre las paredes, generando turbulencias y salpicaduras.
- Movimiento del líquido en su recipiente, ya sea en operaciones de transporte o de agitación y mezcla.
- Transferencia simultánea de dos fases, como, por ejemplo, el bombeo de una mezcla de hidrocarburos/agua o hidrocarburos/aire.
- Arrastre o sedimentación de sólidos en el seno de un líquido.
- Decantación de dos líquidos no miscibles (sistema bifásico).
- Flujo ascendente de burbujas de gas a través de un líquido.

Factores que influyen en la generación de cargas electrostáticas

La generación de cargas electrostáticas en estos procesos está determinada principalmente por los siguientes factores:

- *Resistividad* del fluido
- Velocidad de trasvase
- Forma geométrica de canalizaciones y recipientes
- Sistema de llenado
- Estado de conservación de las superficies de canalizaciones y recipientes
- Presencia de agua no miscible o impurezas en el fluido

Resistividad del fluido

Es claro que, cuanto más baja sea la *resistividad* de un fluido, menos cargas electrostáticas será capaz de acumular y, por tanto, menos problemas presentará en relación con las disipación de dichas cargas.

Como criterio general de seguridad, se puede tener en cuenta lo recogido en la tabla 9.

Tabla 9

Clasificación de sustancias líquidas en función de su peligrosidad frente a la generación de cargas electrostáticas⁴⁶

Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Sustancias inflamables típicas	Peligrosidad	Medidas preventivas
$\leq 10^{12}$	Líquidos polares (alcoholes, ácidos, bases, ésteres, aldehídos, cetonas, ésteres, nitrilos, amidas, aminas, etc.)	Baja	Generales (*)
$10^{12} - 10^{14}$	Líquidos generalmente no polares (hidrocarburos alifáticos: gasóleos, gasolinas, etc.)	Moderada	Generales + control del riesgo (evitar salpicaduras, limitar la velocidad de trasvase, <i>tiempo de relajación</i> ≥ 30 s, llenado por el fondo, vigilancia de impurezas o aditivos, etc.)
$10^{14} - 10^{17}$	Líquidos no polares (hidrocarburos aromáticos: benceno, tolueno, naftaleno, etc.)	Alta	Generales + especiales (ventilación, inertización, <i>tiempo de relajación</i> ≥ 1 min, etc.)
$\geq 10^{17}$		Muy baja (escasa formación de cargas)	Generales

(*) Medidas preventivas generales: prevención de derrames, puesta a tierra de todas las masas susceptibles de adquirir carga, coordinación de actividades, etc. (véase el punto 8.1 de este documento).

Para operaciones de trasvase se puede aplicar la tabla 10, que recoge la *conductividad* de los líquidos inflamables más habituales y los *tiempos de relajación* recomendados.

⁴⁶ NTP-225. Electricidad estática en el trasvase de líquidos inflamables. INSHT, 1998.

NTP-374. Electricidad estática: carga y descarga de camiones cisterna (I). INSHT, 1995.

Informe UNE 109-100:1990. Control de la Electricidad estática en atmósferas inflamables. Procedimientos prácticos de operación. Carga y descarga de líquidos en vehículos-cisterna, contenedores-cisterna y vagones-cisterna.

Tabla 10Tiempos de relajación mínimos recomendados para el trasvase de líquidos inflamables⁴⁷

Sustancia	Conductividad (pS/m)	Tiempo de relajación (s) ⁽¹⁾
Sustancias con conductividad ALTA (> 1000 pS/m)		
Crudo petrolífero	$\geq 10^3$	$\leq 0,02$
Alcoholes	$10^6 - 10^8$	$2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$
Cetonas	$10^5 - 10^8$	$2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-4}$
Agua pura	5×10^6	10^{-6}
Agua (no destilada)	$\geq 10^8$	$\leq 2 \cdot 10^{-7}$
Sustancias con conductividad MEDIA (50 – 1000 pS/m)		
Aceites con aditivos disipativos	$50 - 10^3$	$0,02 - 0,04$
Fuelóleos pesados	$50 - 10^5$	$2 \cdot 10^{-4} - 0,4$
Ésteres	$10^2 - 10^6$	$2 \cdot 10^{-5} - 0,2$
Sustancias con conductividad BAJA (< 50 pS/m)		
Parafinas	$10^{-2} - 10$	$2 - 2000$
Compuestos aromáticos (tolueno, xileno, etc.)	$10^{-1} - 50$	$0,4 - 200$
Gasolinas	$10^{-1} - 10^2$	$0,2 - 200$
Querosenos	$10^{-1} - 50$	$0,4 - 200$
Gasóleos	$1 - 10^2$	$0,2 - 20$
Aceites lubricantes	$10^{-2} - 10^3$	$0,02 - 2000$
Éteres	$10^{-1} - 10^2$	$0,2 - 200$

La adopción de *tiempos de relajación* se puede combinar con un incremento de la *conductividad* del fluido mediante su mezcla con aditivos solubles con el líquido;

⁴⁷ Informe R044-001:1999. *Safety of machinery. Guidance and recommendations for the avoidance of hazards due to static electricity*. CELENEC.

Informe CLC/TR 50404:2003. *Electrostatics - Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity*. CELENEC.

como criterio general, se deberá perseguir que la *conductividad* resultante de la mezcla sea, como mínimo, de 50 pS/m (límite de la *conductividad* media), siendo deseable que sea lo más alta posible.

Ejemplo: la gasolina tiene una resistividad / conductividad de unos $10^{13} \Omega \cdot m$ / 0,1 pS/m; si se le agrega entre 1 y 2 g/m³ de un aditivo antiestático puede llegar a $10^8 \Omega \cdot m$ / 10000 pS/m, lo que reduce sustancialmente el riesgo de incendio o explosión en operaciones de trasvase⁴⁸.

Velocidad de trasvase

Cuanto mayor sea la velocidad de flujo del líquido, mayor será la generación de turbulencias en el seno del mismo, mayor será el rozamiento con las paredes de las canalizaciones y los recipientes que lo contienen y, consecuentemente, mayor será la generación de cargas electrostáticas en el líquido (véase la teoría de la “doble capa”). Se puede aplicar la condición recogida en el punto 7.7 de este documento o el diagrama de la figura 32.

Forma geométrica de canalizaciones y recipientes

Ya se ha visto que el simple rozamiento del líquido con las canalizaciones y recipientes que lo manipulan y almacenan es suficiente para producir cargas electrostáticas; se debe tener un especial cuidado con los llamados “puntos singulares”: bombas, filtros, válvulas, cambios de sección de la tubería (estrechamientos o ensanchamientos), codos, curvas, bifurcaciones, bordes internos, etc., pues en estos elementos se producen cambios bruscos en la dirección del flujo y, por tanto, las turbulencias y el rozamiento con las paredes son mayores que en otros puntos.

Sistema de llenado

En el trasvase de líquidos *inflamables* se deberá evitar, dentro de lo posible, toda situación que suponga aspersión, pulverización o caída libre del fluido, pues en estos casos la generación de cargas electrostáticas en el propio fluido y en las paredes de los recipientes es mucho mayor debido a la gran agitación del fluido. Para reducir al máximo dicha generación, el llenado de recipientes o depósitos con líquidos *inflamables* se debe realizar colocando el brazo de carga (tubería de llenado) lo más cerca posible del suelo del depósito (véase la figura 34).

En caso de que esto no sea posible o mientras el brazo de carga no esté sumergido en el producto (depósito poco lleno), se puede efectuar el trasvase a baja velocidad ($v \leq 1$ m/s), de modo que la generación de cargas sea pequeña.

⁴⁸ NTP-375. Electricidad estática: carga y descarga de camiones cisterna (II). INSHT, 1995.

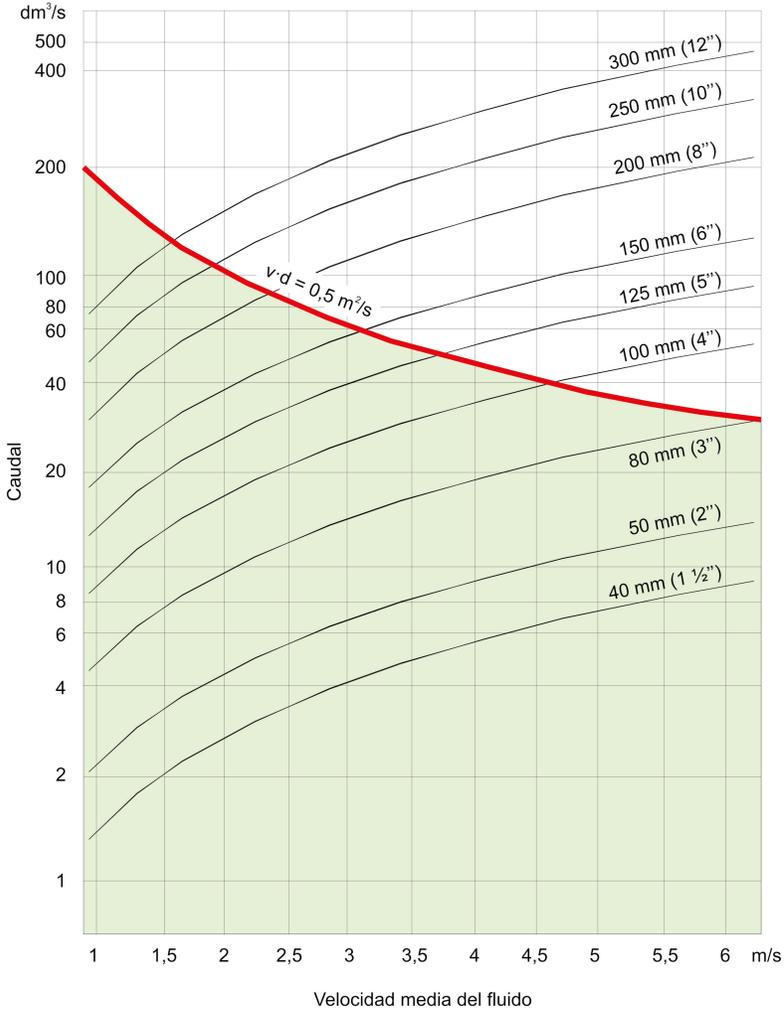


Figura 32. Relación caudal-velocidad según diámetros de tubería⁴⁹

Estado de conservación de las superficies de canalizaciones y recipientes

El óxido, la suciedad, las grietas o cualquier otro deterioro o defecto de las canalizaciones y recipientes producen mayor rozamiento y, por tanto, contribuyen a la generación de cargas electrostáticas.

⁴⁹ NTP-225: Electricidad estática en el trasvase de líquidos inflamables. Norma UNE 109100:1990. Control de la electricidad estática en atmósferas inflamables. INSHT, 1988.

Presencia de agua no miscible o impurezas en el fluido

La presencia en el fluido de agua no miscible o de partículas de diversa índole (óxido, etc.) produce rozamientos en el seno del fluido, con la consiguiente generación de cargas electrostáticas en el mismo.

Medidas preventivas a aplicar durante el trasvase de líquidos inflamables en camiones cisterna

Los procesos de carga y descarga de camiones cisterna de productos *inflamables* son un caso particular del apartado 8.1 y, posiblemente, uno de los más complejos en cuanto a exigencias preventivas y de protección se refiere. Existen unas medidas preventivas generales que se deben adoptar en todo caso y, en función del producto a trasvasar, es posible que se deban aplicar, además, medidas especiales más rigurosas.

a. Medidas preventivas generales

Continuidad eléctrica de la línea de llenado

Durante los procesos de carga de un camión cisterna o de descarga a un depósito enterrado se generan cargas electrostáticas en buena parte de los materiales puestos en juego; en la figura 34 se muestra la distribución simplificada de cargas que se generan durante la carga del depósito de un camión. El fluido adquiere carga de un signo (positivo, en el caso de la figura) y al ser vertido en el depósito, este último adquiere carga de signo opuesto, formándose una capa de esa polaridad sobre la que se deposita una capa del líquido de carga opuesta; este fenómeno puede provocar una súbita recombinación de cargas en forma de chispa, por lo que necesariamente se debe controlar esta situación al menos durante todo el tiempo que dure el trasvase.

Así, el trasvase a o desde camiones cisterna se deberá realizar siempre mediante mangueras construidas con un alma metálica continua y esta deberá estar conectada a tierra durante toda la operación de trasvase. De hecho, la primera y la última etapa de dicha operación deberán ser, respectivamente, la conexión y la desconexión de la puesta a tierra de la manguera. Habitualmente la conexión y la desconexión se realizan de forma automática cuando se conecta la manguera a los puntos de carga y descarga, pero, si esto no fuera posible, la manguera se deberá conectar a tierra manualmente mediante un dispositivo portátil (véase la figura 33).

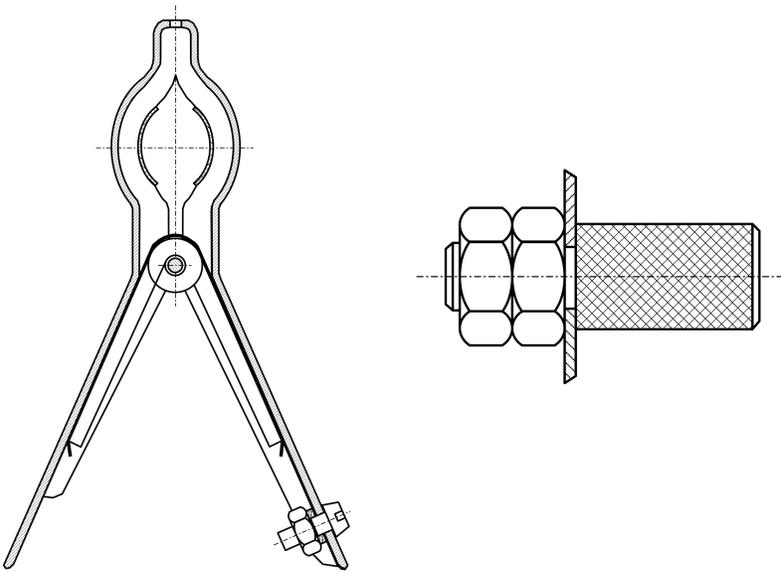


Figura 33. Trasvase de sustancias inflamables. Pinza y borna para la puesta a tierra y equipotencial⁵⁰.

Se deberá garantizar que las uniones de la manguera a los puntos de carga y descarga, a alargaderas y a cualquier otro elemento participante en la operación de trasvase (bombas, filtros, codos, bridas, válvulas, etc.) mantengan la continuidad eléctrica. Si alguno de estos elementos no garantiza la continuidad, se deberá establecer un puente eléctrico entre ambos lados del mismo.

La aplicación de esta medida técnica deberá garantizar que la mayoría de cargas generadas en el proceso se drenan a tierra eficazmente a medida que se producen.

Si el depósito es no conductor o su interior dispone de algún revestimiento o recubrimiento aislante, la puesta a tierra y equipotencial anteriormente descrita puede no constituir una medida de seguridad suficiente; además, si, como suele suceder, el producto a trasvasar tiene baja *conductividad*, se pueden producir situaciones muy peligrosas. En estos casos resulta esencial conocer el comportamiento eléctrico de los revestimientos; existen dos casos habituales:

- Si el espesor de la pared del depósito es pequeño y los materiales de revestimiento son resinas epoxi o fenólicas con *resistividad eléctrica* $\rho \leq 10^{11} \Omega \cdot m$, no hay una gran influencia en el drenaje de las cargas, por lo que el riesgo de ignición no es inminente y se podrá trabajar como si se tratase de un depósito conductor.

⁵⁰ Normas UNE 109108-1:1995 y UNE 109108-2:1995.

- Si el material que está en contacto con el fluido es polietileno, cuya *resistividad eléctrica* puede ser de hasta $10^{20} \Omega \cdot m$, es imprescindible adoptar medidas adicionales, como, por ejemplo, el uso de brazos de carga muy conductores.

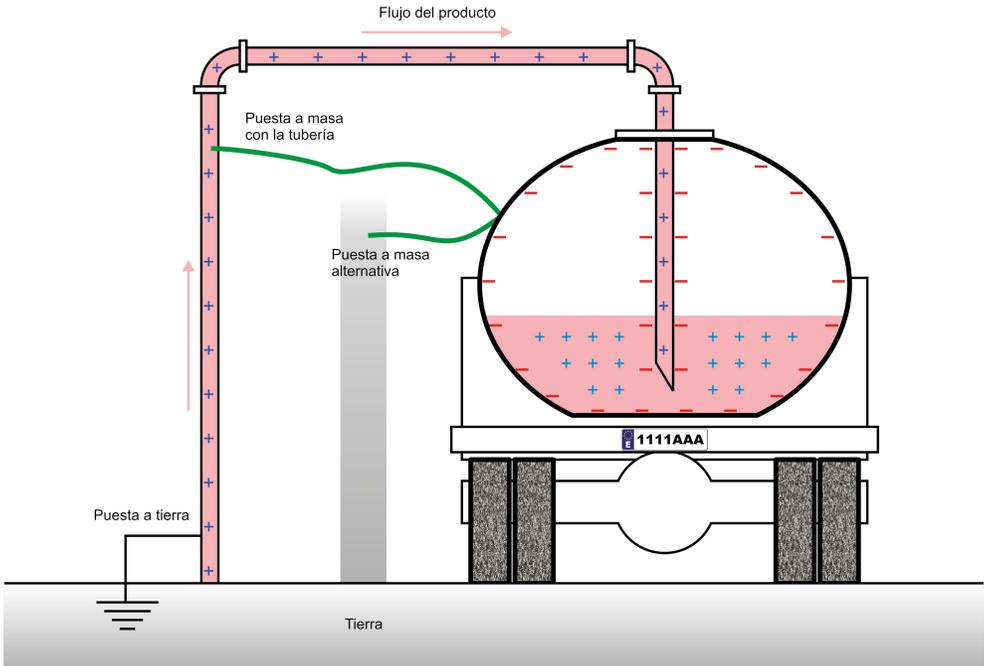


Figura 34. Generación de cargas y conexiones necesarias para el llenado de cisternas por la parte superior⁵¹

Prevención de derrames

El control de los derrames durante el trasvase de líquidos *inflamables* es esencial para evitar tanto la formación de atmósferas peligrosas como la inhalación accidental de las sustancias por parte de los trabajadores. Para llevar a cabo correctamente esta actividad en instalaciones fijas, la medida más eficaz es la instalación de cubetos de retención de derrames. En instalaciones móviles, como es el caso de los camiones cisterna, se pueden utilizar cubetos portátiles para derrames complementadas con productos absorbentes inertes, compatibles con el líquido a trasvasar; para el caso de los hidrocarburos más frecuentes, es habitual el empleo de carbón activo, sepiolita, etc.

⁵¹ Norma UNE 109100:1990 IN.

Cuando la actividad o el proceso lo permita, es deseable poder realizar trasvases automatizados con control del nivel de llenado, prealarma acústica y sistemas automáticos de corte de la carga; de no ser esto posible, al menos se debería disponer de sistemas de control visual de llenado o indicadores de nivel que permitan saber cuándo se está completando la carga de un recipiente para actuar en consecuencia y, de ese modo, evitar derrames o salpicaduras.

Coordinación de actividades

Es muy habitual que en el emplazamiento donde se realiza un trasvase de líquidos *inflamables* se encuentren trabajadores de varias empresas; en este caso, en cumplimiento del Real Decreto 171/2004, sobre coordinación de actividades empresariales, cada empresario deberá adoptar las medidas que sean necesarias para la protección de la salud y la seguridad de sus trabajadores, incluidas las medidas de cooperación y coordinación a que hace referencia el artículo 24 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales. Además, el empresario titular del centro de trabajo correspondiente coordinará la aplicación de todas las medidas relativas a la seguridad y la salud de los trabajadores y precisará las medidas y las modalidades de aplicación de dicha coordinación.

Para el caso concreto de las operaciones de trasvase, se pueden consultar los comentarios al artículo 6 del Real Decreto 681/2003 que recoge la Guía Técnica del INSHT para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de Atmósferas Explosivas en el lugar de trabajo (<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTecnicas/Ficheros/ATM%C3%93SFERAS%20EXPLOSIVAS.pdf>).

El vestuario de trabajo

Durante la realización de operaciones de trasvase, se deberá evitar el uso de prendas fabricadas con fibras sintéticas, botas de goma, zapatos con suela de goma o material sintético similar no conductor. Se deberá propiciar el uso de calzado y suelos conductores.

La limpieza de los tanques

Tradicionalmente los tanques que han contenido *sustancias inflamables* se han limpiado mediante chorro de agua con disolventes a alta velocidad. Este procedimiento genera nieblas altamente cargadas dentro del tanque que pueden conducir a la ignición de cualquier *atmósfera inflamable* que permanezca en el interior. Para realizar esta operación sin riesgos será necesario adoptar alguna medida para evitar la ignición: la inertización con nitrógeno suele ser bastante eficaz para tanques pequeños (en camiones); para tanques grandes (en petroleros) es una solución cara, por lo que en la actualidad se aplican modelos matemáticos para conocer la distribución del potencial electrostático dentro del tanque y, de este

modo, evitar la aproximación de elementos metálicos a las zonas más peligrosas del tanque⁵².

b. Medidas preventivas especiales

Durante el trasvase de líquidos *inflamables* de alta *resistividad*, como es el caso de algunos hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, naftaleno, etc.), las medidas preventivas generales no bastan para controlar el riesgo de ignición.

En estos casos, para garantizar un drenaje eficaz de las cargas generadas será necesario aplicar también alguna medida de las que se describen a continuación o una combinación de las mismas.

Ventilación

La medida más sencilla y eficaz para controlar las igniciones durante el trasvase de líquidos *inflamables* de alta *resistividad* es la ventilación por dilución de toda área en la que se puedan crear mezclas de producto y aire en condiciones de ignición (es decir, con una concentración de producto de, al menos, el *LIE*). Como medida de seguridad adicional se puede adoptar el criterio del 20%, es decir, establecer en la zona de trabajo un sistema de ventilación por dilución que garantice que la concentración de producto *inflamable* no supera en ningún momento ni lugar el 20% del *LIE*:

Producto	LIE (% _{v-v})	20% LIE (% _{v-v})
Benceno	1,2	0,24
Tolueno	1,1	0,22
Naftaleno	0,9	0,18

Inertización

El nitrógeno es el gas inerte más empleado habitualmente. La medida preventiva consiste en la inyección de nitrógeno a presión en las zonas donde se puede formar *atmósfera explosiva* del producto trasvasado, especialmente dentro del depósito, de modo que se reemplaza el aire existente; por consiguiente, disminuye la concentración de oxígeno y se evita la propagación de una ignición. Se considera que un sistema de inertización es eficaz cuando se consigue reducir la concentración de oxígeno al menos al 11%.

MUY IMPORTANTE: si se requiere la presencia de trabajadores en una zona en la que se esté aplicando esta medida preventiva, será necesario seguir un procedimiento para trabajos en espacios confinados que sirva para prevenir, entre otros, el

⁵² "Modelling the electrostatic ignition hazards associated with the cleaning of tanks containing flammable atmospheres". Journal of Loss Prevention in the Process Industries. T.J. Williams, R.T. Jones 2001.

riesgo de asfixia, ya que el ser humano necesita para respirar una concentración de oxígeno en aire entorno al 21%.

Aumento de los tiempos de relajación

El trasvase de líquidos *inflamables* de baja *resistividad* (gasóleos, gasolinas, etc.) requiere un *tiempo de relajación* que no suele superar los 30 segundos.

Sin embargo, el trasvase de líquidos *inflamables* de alta *resistividad* genera una gran cantidad de cargas en el seno de los productos y, además, estos no son capaces de recombinar sus cargas con facilidad; por ello, en estos casos se suele recomendar el establecimiento de *tiempo de relajación* mayores, por lo general de uno a varios minutos (véase la tabla 10).

Es particularmente esencial conocer los tiempos de relajación cuando se deben efectuar operaciones de muestreo en los recipientes, ya que constituyen frecuentemente un foco de ignición en sí mismos. Se deberán respetar los tiempos de relajación con un coeficiente de seguridad amplio. Es preferible el empleo de sistemas cerrados de muestreo, empleando agentes inertizantes en caso de ser necesario. Si no existe otra alternativa que la de usar muestreadores personales, estos deberán ser metálicos y estar conectados equipotencialmente al recipiente.

Se recomienda la consulta de la Guía Técnica del INSHT para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con los agentes químicos presentes en los lugares de trabajo, que describe algunas medidas preventivas prácticas muy útiles para efectuar trasvases de sustancias inflamables con un control eficaz de las cargas electrostáticas que se generan en los procesos (véanse los comentarios al artículo 5, páginas 41 y 42, http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTecnicas/Ficheros/g_AQ.pdf)

8.2. Peligros de las descargas electrostáticas en la superficie de líquidos

Cuando un líquido cargado electrostáticamente llega a un recipiente, por repulsión interna las cargas se irán acumulando en sus superficies.

Se pueden dar dos tipos de escenarios:

- a) Recipiente conectado a tierra (por ejemplo, depósito enterrado): externamente el depósito es eléctricamente neutro como lo es todo el conjunto del contenedor y el contenido, pero en su interior existirán diferencias de potencial entre el líquido y las paredes del recipiente, que se mantendrán hasta que, tras un *tiempo de relajación* (véase la tabla 10), las cargas del líquido se hayan recombinado. No existe ninguna forma de evitar este desequilibrio temporal, pues es inherente al

proceso de trasvase, por lo que, si la carga acumulada en un momento dado es muy alta, se podría producir una descarga disruptiva entre la superficie libre del líquido y la pared interior del recipiente. En este caso, la única forma de evitar la ignición es garantizando una atmósfera interior **ininflamable**.

- b) Recipiente aislado de tierra (por ejemplo, depósito de un camión-cisterna): la carga acumulada en la superficie del líquido atrae una carga igual y de signo contrario hacia el interior del recipiente; si se admite que, como es habitual, la pared del depósito sea metálica, entonces quedará una carga igual a la del líquido en la pared exterior del depósito. En esta situación es muy posible que se produzca una descarga disruptiva entre la boca del recipiente y la tubería de llenado o cualquier otro elemento metálico conectado eléctricamente a tierra; si el líquido trasvasado es combustible, entonces se está generando una situación de alto riesgo al estar presente en la zona una *atmósfera inflamable*.

8.3. Manipulación de gases combustibles

Los gases combustibles forman mezclas inflamables al contacto con el aire, por lo que ante una fuente de ignición pueden arder o explosionar.

Algunas medidas preventivas y de protección específicas que se deben adoptar son:

- Deberá garantizarse una estanqueidad total de las canalizaciones y recipientes para evitar fugas.
- Se establecerán procedimientos de trabajo y permisos de trabajo específicos.
- Cuando se realicen operaciones sobre conducciones en carga, se tomarán las medidas necesarias para trabajar sin salida de gas o con salida controlada de este.
- Los tramos de instalación que queden en carga se deberán mantener a la presión de gas suficiente y necesaria para evitar el riesgo de formación de mezcla con aire. En caso de duda, se purgará la instalación afectada aguas abajo. Los dispositivos de purga deberán disponer de un tapón metálico (acero, aluminio, etc.) para evitar que durante la salida del gas dicho tapón quede cargado electrostáticamente, ya que de ser así una chispa podría provocar la ignición del gas saliente.
- Se utilizarán equipos de protección individual específicos para la zona de trabajo, que sean antiestáticos. Adicionalmente, deberán tener otras propiedades (ignífugo, criogénico, etc.) que dependerán del estado del gas y de la operación a realizar.
- En la descarga de gas natural licuado (GNL) desde camiones cisterna, la estructura metálica del camión y todas las partes metálicas de la tubería de trasiego

deberán estar puestas a tierra y unidas equipotencialmente entre sí desde antes de que se inicien los trabajos de trasiego hasta después de que hayan finalizado.

- Antes del montaje o desmontaje de elementos de la instalación (válvulas, contadores, etc.) se colocará siempre un puente que dé continuidad a la canalización afectada. Cualquier instalación susceptible de producir una chispa por descarga de electricidad estática será puesta a tierra antes de ser manipulada.

8.4. Manipulación de polvos combustibles mediante sacos

Como ya se ha descrito en el punto 3 (véase la figura 10e), la manipulación de sustancias en forma de *polvo* produce electricidad estática por fricción. Cuando se llena un saco con material a granel, la electricidad estática se acumula en el interior del saco por encima del producto, llegando a crearse un *campo eléctrico* capaz de producir una descarga disruptiva. Cuando este proceso tiene lugar en una zona clasificada con riesgo de explosión, sea debido a la dispersión en el aire del propio producto manipulado o a la presencia de cualquier otra sustancia *inflamable* o combustible, es necesario aplicar alguna medida de protección para evitar la ignición.

En la industria química, farmacéutica, plástica, alimentaria, minera, forrajera, construcción, etc. es muy habitual la utilización de sacos para la manipulación de productos granulados o en forma de polvo dentro de la planta. Para ello, se suelen utilizar grandes sacos suspendidos denominados FIBC (*Flexible Intermediate Bulk Containers*) o, más comúnmente, “big bags” (véase la figura 35). Estos sacos están a medio camino (500 – 1500 kg) entre los sacos pequeños y el transporte a granel en depósitos rígidos. Se suelen fabricar a partir de polipropileno tejido, material muy aislante que puede alcanzar una *resistividad eléctrica* de $10^{16} - 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$.



Figura 35. FIBC o “big bag”

Además, debido a su tamaño y frecuencia de utilización, los “big bags” pueden suponer un problema desde el punto de vista de la generación y acumulación de cargas electrostáticas, ya que en función del producto a manipular, las cargas acumuladas pueden ser muy elevadas. Y si, como suele suceder, el producto es combustible, el riesgo de explosión es evidente.

La norma UNE-EN ISO 21898:2006 recoge una serie de especificaciones técnicas que deben cumplir estos sacos, entre ellas la obligatoriedad de contemplar y mostrar por escrito características disipativas cuando esto sea necesario (véanse los puntos 3.7.2 y 7.1 de la citada norma).

La norma UNE-EN 61340-4-4:2006 establece la siguiente clasificación electrostática de los FIBC:

- Tipo A: sin ninguna protección contra las cargas electrostáticas. No es apto para transportar productos inflamables ni para ser utilizado en presencia de sustancias inflamables en el ambiente circundante.



EMBALAJE CONDUCTOR

AL LLENAR O VACIAR CONECTAR A TIERRA

- Tipo B (antiestático): con una tensión de perforación inferior a 4 kV para prevenir la propagación de descargas. Es apto para transportar *polvos* inflamables pero no es apto para ser utilizado en presencia de sustancias inflamables en el ambiente circundante.

- Tipo C (*conductor*): dispone de filamentos conductores interconectados (véase la figura 36), asas conductoras y tomas de tierra; tensión de perforación inferior a 4



Figura 36. “Big bag” tipo C: marcado específico⁵³ e instrucciones de utilización; detalle del tejido conductor⁵⁴

kV. Las cargas electrostáticas peligrosas están eliminadas con seguridad. Cuando se vacía y llena el saco tiene que estar puesto a tierra. Es apto para transportar polvos inflamables incluso en presencia de sustancias inflamables en el ambiente circundante.

⁵³ Norma UNE-EN 60617-2:1997. Símbolos gráficos para esquemas. Parte 2: Elementos de símbolos, símbolos distintivos y otros símbolos de aplicación general.

⁵⁴ La imagen de detalle del tejido conductor es cortesía de Sacos Hidalgo, S.L.

- Tipo D (disipativo): tiene propiedades parcialmente conductoras para facilitar la disipación de la carga electrostática mediante una descarga de baja intensidad de tipo corona. Las cargas electrostáticas peligrosas se reducen pero no se eliminan. Cuando se vacía y llena el saco todos los elementos aislados y las personas alrededor del mismo tienen que estar puestos a tierra, pero no así el saco ya que por su propia configuración no lo necesita. Es apto para transportar polvos inflamables incluso en presencia de sustancias inflamables en el ambiente circundante.

De este modo, para la utilización segura de los “big bags” se puede aplicar el criterio recogido en la tabla 11.

Tabla 11
Selección de “big bags” con propiedades antiestáticas⁵⁵

Interior del “big bag”	Exterior del “big bag”					
	Zona peligrosa	Mezclas explosivas de polvo + aire			Mezclas explosivas de gas/vapor + aire	
		Sin zona	Zona 22	Zona 21	Zona 20	Zona 2
Polvo no combustible	A	B	B	C + D	C	C
Polvo con MIE > 3 mJ y resistencia específica < 10 ¹¹ Ω.m	B	B	B	C + D	C	C
Polvo con MIE > 3 mJ	B	B	C	C	C	C
Polvo con MIE < 3 mJ	C	C	C	C	C	C

⁵⁵ NFPA 654. *Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing and Handling of Combustible Particulate Solids*. NFPA, 2006.

8.5. Aplicación de la Exigencia básica SUA 8: Seguridad frente al riesgo relacionado con la acción del rayo (véase el apartado 5.7)

Ejemplo 1: fábrica de harina situada en la provincia de Huesca; edificio aislado formado por una nave diáfana de 10 x 25 m y un silo adosado a la misma de 10 m de diámetro y 15 m de altura.

$$N_e = N_g A_e C_1 10^{-6} \text{ [nº impactos/año]}$$

siendo:

$N_g = 5$ impactos/año·km² (densidad de impactos sobre el terreno).

A_e = superficie de captura equivalente del edificio aislado [m²].

Para calcular la superficie de captura equivalente del edificio, se deberán determinar las dimensiones de la parcela resultante de aplicar el criterio recogido en el CTE. Previamente se toma $H = 15$ m (que es la altura del silo) como aproximación conservadora de la altura de la fábrica. Por tanto:

$$\text{Anchura de la parcela} = 10 \text{ (nave)} + 10 \text{ (silo)} + 2 \times 3H = 110 \text{ m}$$

$$\text{Longitud de la parcela} = 25 \text{ (nave)} + 2 \times 3H = 115 \text{ m}$$

Por tanto: $A_e = 110 \times 115 = 12650$ m².

C_1 = coeficiente relacionado con el entorno = 1 (edificio aislado)

Por tanto:

$$N_e = 5 \times 12650 \times 1 \times 10^{-6} = 0,06325 \text{ impactos/año}$$

A partir de este dato se puede calcular el riesgo admisible, N_a , de la fábrica:

$$N_a = \frac{5,5}{C_2 C_3 C_4 C_5} 10^{-3}$$

siendo:

$C_2 = 1$ (estructura de hormigón con cubierta metálica)

$C_3 = 3$ (edificio con contenido inflamable)

$C_4 = 1$ (resto de edificios)

$C_5 = 1$ (resto de edificios)

Por tanto:

$$N_a = \frac{5,5}{3} 10^{-3} = 0,00183 \text{ impactos/año}$$

De estos datos se puede obtener el tipo de **instalación de protección frente al rayo** exigido:

Eficacia E requerida para la instalación:

$$E = 1 - \frac{N_a}{N_e} = 1 - \frac{0,00183}{0,06325} = 97,1\%$$

Por tanto, para esta fábrica se necesita una instalación que ofrezca una protección de **nivel 2**; las características básicas del sistema de protección para dicho nivel son las siguientes (véase el anejo SUA B del CTE):

- *Sistema externo (captadores + conductores de bajada):*

En función del nivel de protección determinado, se dimensionarán los captadores de descargas (puntas Franklin, mallas conductoras o pararrayos con dispositivo de cebado), así como los conductores o derivadores necesarios para un drenaje efectivo de las descargas.

- *Sistema interno (uniones equipotenciales):*

Este sistema comprende los dispositivos que reducen los efectos eléctricos y magnéticos de la corriente de la descarga atmosférica dentro del espacio a proteger.

Para ello, se deberán unir la estructura metálica del edificio, la instalación metálica, los elementos conductores externos, los circuitos eléctricos y de telecomunicación del espacio a proteger y el sistema externo de protección, si lo hubiera, con conductores de equipotencialidad o protectores de sobretensiones a la red de tierra.

- *Red de tierra:*

Será la adecuada para dispersar en el terreno la corriente producida por las descargas atmosféricas.

Ejemplo 2: estación de servicio de carburantes líquidos situada en la provincia de Cádiz; edificio aislado formado por una construcción de estructura metálica de 5 x 10 m y una cubierta metálica adosada sobre las líneas de servicio (surtidores) de 15 m de longitud transversal y 5 m de altura.

$$N_g = 1,5 \text{ impactos/año. km}^2$$

$$A_e = 40 \times 50 = 2000 \text{ m}^2.$$

$$C_1 = 1 \text{ (edificio aislado)}$$

Luego:

$$N_e = N_g A_e C_1 10^{-6} = 0,003 \text{ impactos/año}$$

$$C_2 = 0,5 \text{ (estructura y cubierta metálicas)}$$

$$C_3 = 3 \text{ (edificio con contenido inflamable)}$$

$$C_4 = 3 \text{ (uso comercial)}$$

$$C_5 = 5 \text{ (edificio cuyo deterioro puede ocasionar un impacto ambiental grave)}$$

Luego:

$$N_a = \frac{5,5}{C_2 C_3 C_4 C_5} 10^{-3} = 0,000244 \text{ impactos/año}$$

Por tanto, la eficacia requerida para la instalación es:

$$E = 1 - \frac{N_a}{N_e} = 91,9\%$$

Luego, para la estación de servicio se necesita una instalación que ofrezca una protección de **nivel 3**.

BIBLIOGRAFÍA

Disposiciones legales

Real Decreto 1407/1992, de 20 de noviembre, por el que se regulan las condiciones para la comercialización y libre circulación intracomunitaria de los equipos de protección individual. BOE de 28 de diciembre.

https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1992-28644

Real Decreto 400/1996, de 1 de marzo, por el que se dicta las disposiciones de aplicación de la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 94/9/CE, relativo a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas. BOE de 8 de abril.

<http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1996-7800>

Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. BOE de 23 de abril.

https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1997-8669

Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual. BOE de 12 de junio.

https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1997-12735

Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas. BOE de 31 de diciembre.

<http://www.boe.es/boe/dias/1999/12/31/pdfs/A46463-46482.pdf>

Real Decreto 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico. BOE de 21 de junio.

<http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2001-11881>

Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión. BOE de 18 de septiembre.

http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-18099

Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. BOE de 18 de junio.

http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2003-12099

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. BOE de 28 de marzo.

http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2006-5515

Real Decreto 97/2014, de 14 de febrero, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español. BOE de 27 de febrero.

http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-2110

Normativa técnica

Informe UNE 109100:1990 IN. Control de la electricidad estática en atmósferas inflamables. Procedimientos prácticos de operación. Carga y descarga de vehículo-cisterna, contenedores-cisterna y vagones-cisterna. AENOR.

Informe UNE 109101-1:1995 IN. Control de la electricidad estática en el llenado y vaciado de recipientes. Parte 1: recipientes móviles para líquidos inflamables. AENOR.

Informe UNE 109101-2:1995 IN. Control de la electricidad estática en el llenado y vaciado de recipientes. Parte 2: carga de productos sólidos a granel en recipientes que contienen líquidos inflamables. AENOR.

Informe UNE 109104:1990 IN. Control de la electricidad estática en atmósferas inflamables. Tratamiento de superficies metálicas mediante chorro abrasivo. Procedimientos prácticos de operación. AENOR.

Norma UNE 109108-1:1995. Almacenamiento de productos químicos. Control de electricidad estática. Parte 1: pinza de puesta a tierra. AENOR.

Norma UNE 109108-2:1995. Almacenamiento de productos químicos. Control de la electricidad estática. Parte 2: borna de puesta a tierra. AENOR.

Norma UNE 109110:1990. Control de la electricidad estática en atmósferas inflamables. Definiciones. AENOR.

Norma UNE-EN 61340-4-4:2006. Electrostática. Parte 4-4: Clasificación electrostática de contenedores polivalentes flexibles para productos a granel (FIBC). Métodos de ensayo normalizados para aplicaciones específicas.

Norma UNE-EN 61340-5-2:2002. Electrostática. Parte 5-2: Protección de componentes electrónicos frente al fenómeno electrostático. Guía de aplicación. AENOR.

Norma UNE-EN ISO 20345:2012. Equipo de protección individual. Calzado de seguridad. AENOR.

Norma UNE-EN ISO 20346:2005. Equipo de protección personal. Calzado de protección. AENOR.

Norma UNE-EN ISO 20347:2013. Equipo de protección personal. Calzado de trabajo. AENOR.

Norma EN 61340-5-1:2007. Electrostática. Parte 5-1: Protección de componentes electrónicos frente al fenómeno electrostático. Requisitos generales. CEN.

Informe R044-001:1999. *Guidance and recommendations for the avoidance of hazards due to static electricity*. CENELEC.

Informe CLC/TR 50404:2003. *Electrostatics - Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity*. CENELEC.

Final Draft CEN/TR 16832. *Selection, use, care and maintenance of personal protective equipment for preventing electrostatic risks in hazardous areas (explosion risks)*. CENELEC.

Guías, documentos técnicos y otras fuentes de información

Angelico D., 2009. “*Controlling and Removing Static Electricity During Confined Space Entry Ventilation*”. En: EHS Today nº 25, pp.50-52.

http://ehstoday.com/industrial_hygiene/news/controlling-removing-static-3990

Astbury, G.R., Harper, A.J., 2001. “*Large scale chemical plants: eliminating the electrostatic hazards*”. En: Journal of loss prevention in the process industries, n. 142, pp. 135-137.

Britton L.G., 1999. *Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations*. ISBN 0-8169-0800-1.

Daimiel Mora, C., 2006. “Electricidad estática: ¿un simple susto o peligro real?” En: Gestión práctica de riesgos laborales, n. 32, pp. 18-24.

Escuer Ibars, F. y Garcia Torrent, J. Colegio de Ingenieros Industriales de Barcelona, 2005. Clasificación de zonas en atmósferas explosivas. Manual práctico. D.L. B-11.484-05.

Font Tullot, I., 2000. Climatología de España y Portugal (nueva versión). ISBN 9788478009442.

http://www.fundacionfuego.es/expoquimia/JornadaTecnica_IsabelSanchis.pdf

Glor, M., 2001. “*Overview of the occurrence and incendivity of cone discharges with case studies from industrial practice*”. En: Journal of loss prevention in the process industries, n. 142, pp. 123-128.

Glor, Martin. Pey, Alexis. 2011. “*Fires and explosions initiated by static electricity- case histories*”. En: Loss prevention bulletin, n. 217, pp. 4-8.

<http://iclib.nipc.net/pubs/new-articles/90-06/En-90-06/845.pdf>

Glor, M., Thurnherr, P., 2010. Ignition hazards caused by electrostatic charges in industrial processes. ISBN 978-3-905850-06-2.

http://www.thuba.com/display.cfm/id/102744/disp_type/display/filename/elektrostatik_e.pdf

Hoppe, T., Jaeger N., Terry J., 2000. "Safe handling of combustible powders during transportation, charging, discharging and storage". En: Journal of loss prevention in the process industries, n. 133, pp. 253-263.

Jaeger, N., 2001. "Safety strategy against potential hazards due to the handling of powders in a blending unit". En: Journal of loss prevention in the process industries, n. 142, pp. 139-151.

Lacosta Berna, J. M., 1997. "La electricidad estática y los riesgos de incendio y explosión (I)". En: Prevención, n. 142, pp. 54-70.

Lacosta Berna, J. M., 1998. "La electricidad estática y los riesgos de incendio y explosión (II)". En: Prevención, n. 143, pp. 42-61.

O'Brien, M., 2011. "Static earthing protection for road tankers". En: Loss prevention bulletin, n. 221, pp. 2-5.

http://www.newson-gale.co.uk/documents/ng_uk_ettg_22.pdf

Pando R., 2006. Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Aspectos Básicos de las Descargas Atmosféricas, ISSN 1668-9178.

Williams, T.J., Jones, R.T., 2001. "Modelling the electrostatic ignition hazards associated with the clearing of tanks containing flammable atmospheres". En: Journal of loss prevention in the process industries, n. 142, pp. 129-133.

Agencia de Salut Pública de Barcelona. 2007. Lipoatrofia semicircular: protocolo de actuación. Departament de Treball de la Generalitat de Catalunya, Departament de Salut de la Generalitat de Catalunya.

http://www.gencat.net/treball/doc/doc_34429608_2.pdf

Comisión Europea 2005. Guía de buenas prácticas para la aplicación 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 de la Directiva 1999/92/CE. ISBN 92-894-8717-8.

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/INSHT%20en%20Europa/destacados/Documentacion/Ficheros/GuiaATEX.pdf>

INRS, 2004. *Electricité statique*, Berger, N. [et al]. ED 874. ISBN 2-7389-1196-X.

INSHT, 1988. Nota técnica de prevención NTP-225. Electricidad estática en el trasvase de líquidos inflamables. Bestratén Belloví, M. ISSN 0212-0631.

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp_225.pdf

INSHT, 1995. Nota técnica de prevención NTP-374. Electricidad estática: carga y descarga de camiones cisterna (I). Méndez Bernal, B. ISSN 0212-0631.

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_374.pdf

INSHT, 1995. Nota técnica de prevención NTP-375. Electricidad estática: carga y descarga de camiones cisterna (II). Méndez Bernal, B. ISSN 0212-0631.

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_375.pdf

INSHT, 2001. Nota técnica de prevención NTP-567. Protección frente a cargas eléctricas. Turmo Sierra, E., ISSN 0212-0631

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_567.pdf

INSHT, 2007. Nota técnica de prevención NTP-768. Trasvase de agentes químicos: medidas básicas de seguridad. Alonso Martín, C. ISSN 0212-0631.

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/752a783/ntp-768%20.pdf>

INSHT, 2008. Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de Atmósferas Explosivas en el lugar de trabajo. NIPO 792-08-015-3. ISBN 978-84-7425-764-9.

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTecnicas/Ficheros/ATM%C3%93SFERAS%20EXPLOSIVAS.pdf>

INSHT, 2010. Nota técnica de prevención NTP-827. Electricidad estática en polvos combustibles (I): características de las descargas electrostáticas. ISSN 0212-0631.

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/821a921/827%20web.pdf>

INSHT, 2010. Nota técnica de prevención NTP-828. Electricidad estática en polvos combustibles (II): medidas de seguridad. ISSN 0212-0631.

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/821a921/828%20web.pdf>

INSHT, 2013. Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con los agentes químicos en los lugares de trabajo. NIPO 272-13-045-X. ISBN 978-84-7425-810-3.

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTecnicas/Ficheros/gAQ.pdf>

INSHT, 2015. Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales.

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FICHAS%20DE%20PUBLICACIONES/EN%20CATALOGO/Higiene/2015%20Seguridad%20y%20salud%20en%20el%20trabajo%20con%20nanomateriales/SST%20con%20nanomateriales.pdf>

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS),

<http://www.ineris.fr/>

OSALAN, Instituto Vasco de Seguridad y Salud Laborales. Guía para la actuación de los servicios de prevención ante casos de lipoatrofia semicircular.

http://www.osalan.euskadi.eus/s94-osa0054/es/contenidos/informacion/lipoatrofia_semicircular/es_lipo_sem/adjuntos/lipoatrofia_guia.pdf

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A

Atmósfera explosiva: Mezcla con el aire, en condiciones atmosféricas⁽¹⁾, de sustancias inflamables en forma de gases, vapores, nieblas o polvos, en la que, tras una ignición, la combustión se propaga a la totalidad de la mezcla no quemada.

(1) A efectos de esta definición, se pueden considerar “condiciones atmosféricas” una temperatura de -20°C a 60°C y una presión entre 0,8 bar y 1,1 bar (Fuente: Guía Europea de la Directiva 94/9/CE).

C

Campo eléctrico (E): Magnitud vectorial que expresa la intensidad de las fuerzas eléctricas. Se mide en voltios por metro (V/m).

Conductividad eléctrica (σ o γ): Medida de la capacidad de un material para dejar circular cargas eléctricas. Está especificada principalmente para líquidos. Es la magnitud inversa de la *resistividad*. Se mide en siemens por metro (S/m o $\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$).

D

Dieléctrico: Dícese de un material que es mal conductor de la electricidad, por lo que puede ser utilizado como aislante eléctrico y, además, si es sometido a un campo eléctrico externo, puede establecerse en él un campo eléctrico interno, a diferencia de los materiales aislantes con los que suelen confundirse. Todos los materiales dieléctricos son aislantes pero no todos los materiales aislantes son dieléctricos. Ejemplos: vidrio, cerámica, goma, mica, cera, papel, madera seca, porcelana, baquelita, ciertas grasas de uso industrial y electrónico; aire, nitrógeno, hexafluoruro de azufre (SF₆), etc.

E

“Efecto punta”: Efecto físico que se produce por la acumulación de energía en las partes puntiagudas de un cuerpo. Cuando un material posee carga eléctrica, esta se distribuye por todo su volumen (o superficie, si se trata de cuerpos conductores). La densidad de carga es la carga por unidad de volumen o superficie en el cuerpo, de manera que, si la carga se distribuye en el cuerpo, su densidad será mayor en las zonas de menos volumen o menos superficie. Por ello, se produce una acumulación de energía en las zonas del material acabadas en punta donde su volumen es menor y se concentra mayor cantidad de carga, de manera que, si el material está expuesto a un campo eléctrico externo, tenderá a interactuar con este por la zona de mayor densidad de carga, es decir, en la punta.

Electrón: Partícula elemental con una carga eléctrica negativa de $1,602 \times 10^{-19}$ coulombios y una masa de $9,1083 \times 10^{-28}$ g (1836 veces menor que la del *protón*), que se encuentra formando parte de los átomos de todos los elementos.

Emplazamiento peligroso: Espacio en el que una atmósfera de gas explosiva está o puede estar presumiblemente presente en una cuantía tal, como para requerir precauciones especiales en la construcción, instalación y utilización de aparatos.

Energía mínima de ignición o inflamación (EMI): Energía mínima necesaria para conseguir la inflamación de la atmósfera para una determinada concentración. Se mide en julios (J), aunque por razones prácticas generalmente se utilizan unidades más pequeñas (mJ, μ J).

H

*Humedad relativa del aire (HR)*⁵⁶: La humedad relativa de una masa de aire es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene y la que tendría si dicha masa de aire estuviera completamente saturada:

$$HR = 100 \frac{P_{H_2O}}{P^*_{H_2O}}$$

donde: HR [%] = humedad relativa de la mezcla de aire

P_{H_2O} [Pa] = presión parcial de vapor de agua en la mezcla de aire

$P^*_{H_2O}$ [Pa] = presión de saturación de agua a la temperatura de la mezcla de aire

I

Ion: Átomo o agrupación de átomos que adquieren carga eléctrica por pérdida o ganancia de uno o más electrones.

L

Límite inferior de explosividad (LIE) o límite inferior de inflamabilidad (LII): Concentración mínima de una sustancia inflamable en aire por debajo de la cual la mezcla no es explosiva. Para gases o vapores se mide en % en volumen (m^3 sustancia/ m^3 aire) y para nieblas y polvos, en peso de sustancia/volumen de aire (generalmente mg/m^3).

Límite superior de explosividad (LSE) o límite superior de inflamabilidad (LSI): Concentración máxima de una sustancia inflamable en aire por encima de la cual la

⁵⁶ Norma UNE-EN ISO 13731:2002. Ergonomía del ambiente térmico. Vocabulario y símbolos.

mezcla no es explosiva. Para gases o vapores se mide en % en volumen (m^3 sustancia/ m^3 aire) y para nieblas y polvos, en peso de sustancia/volumen de aire (generalmente mg/m^3).

M

Material aislante: Aquel cuya resistividad eléctrica es mayor de $10^{10} \Omega \cdot \text{m}^{57}$.

Material conductor: Aquel cuya resistividad eléctrica es inferior a $10^{10} \Omega \cdot \text{m}^{58}$.

Material hidrófobo: Aquel que repele el agua, impidiendo que la humedad del aire se deposite sobre su superficie.

N

Neutrón: Partícula elemental eléctricamente neutra y de masa ligeramente superior a la del protón, que se encuentra formando parte de los átomos de los elementos.

P

Polvos: Nombre genérico que se da a las partículas de materiales sólidos que tienen un diámetro inferior a 500 micrómetros (μm).

Polvo combustible: Partículas sólidas muy finas, de tamaño nominal del orden de 500 μm o menos, que pueden estar en suspensión en el aire, pudiéndose depositar por su propio peso, que se pueden quemar o consumirse en el aire y que son susceptibles de formar mezclas explosivas con el aire en Condiciones Normales de presión y temperatura⁵⁹.

Polvo conductor o polvo conductivo: Polvo con resistividad eléctrica igual o inferior a $10^3 \Omega \cdot \text{m}^{60}$.

Polvo no conductor o polvo no conductivo: Polvo con resistividad eléctrica superior a $10^3 \Omega \cdot \text{m}^{61}$.

Protón: Partícula elemental con una carga eléctrica positiva de $1,602 \times 10^{19}$ culombios y una masa de $1,6726 \times 10^{-24}$ g (1836 veces mayor que la del *electrón*), que se encuentra formando parte de los átomos de todos los elementos.

⁵⁷ Informe UNE 109 101-1:1995 IN.

⁵⁸ NTP-225. Electricidad estática en el trasvase de líquidos inflamables. INSHT,1988.

⁵⁸ NTP-374. Electricidad estática: carga y descarga de camiones cisterna (I). INSHT,1995.

Informe UNE 109-100:1990. Control de la Electricidad estática en atmósferas inflamables. Procedimientos prácticos de operación. Carga y descarga de líquidos en vehículos-cisterna, contenedores-cisterna y vagones-cisterna.

⁵⁹ Norma UNE-EN 60079-0:2012.

⁶⁰ Normas UNE-EN 61241-2-2:1997 y UNE-EN 60079-0:2007.

⁶¹ NTP-375. Electricidad estática: carga y dscarga de camiones cisterna (II). INSHT,1995.

R

Rango de explosividad o rango explosivo: Concentración de una sustancia inflamable en forma de gas, vapor o niebla mezclada con el aire, comprendida entre los límites inferior y superior de explosividad de dicha sustancia, entre los cuales la mezcla es explosiva. Se mide en % en volumen.

Recipiente aislante: Aquel que está construido con materiales aislantes o con materiales conductivos con un revestimiento interior de material aislante de espesor superior a 2 mm⁶².

Recipiente conductivo: Aquel que está construido con materiales conductivos y que puede tener un revestimiento interior de material aislante de espesor inferior a 2 mm⁶³.

Resistencia superficial (R_s): Resistencia al paso de la corriente por la superficie de un cuerpo. Permite estimar la disipación de cargas por la superficie de un sólido. Se mide en ohmios (Ω).

Resistencia volumétrica (R_v): Resistencia total al paso de la corriente entre dos puntos de un objeto; depende del material y de su geometría. Se mide en ohmios (Ω).

Resistencia de fuga a tierra (R_{T_r}): Resistencia total al paso de la corriente entre un punto y tierra.

Resistividad eléctrica (ρ): Resistencia eléctrica específica de un material para oponerse al paso de la corriente eléctrica. Es una constante de cada material y se suele definir para sólidos, líquidos o polvos a granel. Se mide en ohmios-metro ($\Omega\cdot m$):

$$\rho = R \frac{S}{L}$$

donde: R [Ω] = resistencia

S [m^2] = sección transversal del material

L [m] = longitud del material

Resistividad superficial (ρ_s): Resistencia al paso de la corriente por la superficie cuadrada de una muestra plana de pequeño espesor. Es independiente de la superficie del cuadrado. Se emplea para estimar la disipación de cargas por la superficie de un sólido. Se mide en ohmios por cuadro (Ω/\blacksquare).

⁶² Informe UNE 109 101-1:1995 IN.

⁶³ NTP-225: Electricidad estática en el trasvase de líquidos inflamables. INSHT,1988.
Norma UNE 109100:1990. Control de la electricidad estática en atmósferas inflamables.

Rigidez dieléctrica o electrostática (ϵ): Valor límite de la intensidad del campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aislante y pasa a ser conductor; también se define como la máxima tensión eléctrica que puede soportar un material aislante sin perforarse. Se mide en voltios por metro (V/m).

S

Sustancia inflamable: Sustancia capaz de sufrir una reacción exotérmica con el aire después de una ignición y cuyo punto de inflamación es inferior a 38°C.

Sustancia combustible: Sustancia capaz de sufrir una reacción exotérmica con el aire después de una ignición y cuyo punto de inflamación es superior a 38°C.

T

Temperatura de inflamación, punto de destello, punto de inflamabilidad o “flash point”: Temperatura mínima necesaria, en condiciones normales de presión (760 mmHg = 1,013 bar), para que una sustancia combustible desprenda vapores que, al mezclarse con el oxígeno del aire u otra sustancia oxidante capaz de arder, pueden originar una inflamación de la mezcla. Es la temperatura mínima para la que sobre la superficie de una sustancia combustible se alcanza el *límite inferior de explosividad*.

Temperatura de ignición o de autoignición: Temperatura mínima para que un producto entre en combustión de forma espontánea, es decir, sin necesidad de un foco de ignición externo.

Temperatura superficial máxima: Temperatura máxima alcanzada en servicio y en las condiciones más desfavorables por cualquier pieza o superficie de material eléctrico que pueda originar la ignición de la atmósfera circundante.

Tiempo de relajación: Tiempo durante el cual la carga electrostática sobre una superficie sólida, en la mayor parte de un líquido o de un polvo, o en una nube de niebla o de polvo, decae exponencialmente a $1/e$ (es decir, aproximadamente al 37%) de su valor original⁶⁴. En la práctica, es el tiempo que necesita una sustancia para que las cargas electrostáticas acumuladas en su seno se recombinen lo suficiente como para que no se puedan producir descargas peligrosas. Se mide en segundos.

Tiempo de semi-disipación ($t_{50\%}$)⁶⁵: Tiempo que tarda la intensidad del campo electrostático en alcanzar la mitad de su valor máximo ($E_{\text{máx}}/2$). Se mide en segundos.

⁶⁴ Informe CLC/TR 50404:2003. *Electrostatics - Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity*. CENELEC.

⁶⁵ Norma UNE-EN 1149-3:2004. *Ropas de protección. Propiedades electrostáticas. Parte 3: Métodos de ensayo para determinar la disipación de la carga*.



DD.76.1.15



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE EMPLEO
Y SEGURIDAD SOCIAL



INSTITUTO NACIONAL
DE SEGURIDAD E HIGIENE
EN EL TRABAJO