



**MÓDULO DEL DIPLOMADO INGENIERÍA DEL FUEGO.
- PETROECUADOR -**

Tema: **“Seguridad contra incendios en instalaciones eléctricas de baja tensión”.**

Profesor: **Ing. Frank Amores Sánchez, Especialista de PCI, APCI, Cuba.**

Fecha: **Septiembre- Octubre de 2010.**

INDICE

	Pág.
6.1. CONCEPTOS BÁSICOS:	2
6.2. COMPOSICIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS	7
6.2.1. Requerimientos generales de seguridad para las instalaciones eléctricas	10
6.3. CAUSAS DE INCENDIO DE ORIGEN ELÉCTRICO	16
6.3.1. Causas eléctricas de incendio	16
6.3.2. Comportamiento ante el fuego del aislamiento de los conductores	24
6.3.3. Medidas de protección contra el fuego para conducciones eléctricas	27
6.3.4. Minimización de los riesgos de incendio en instalaciones eléctricas	31
6.4. PROTECCIÓN CONTRA RAYOS	35
6.4.1. El rayo como origen de incendio	37
6.4.2. Análisis de riesgo de impacto de rayo	42
6.4.3. Características generales de los Sistemas de Protección Contra Rayos	46
6.4.4. Sistema externo de protección contra rayos (SPCR_{EXT})	46
6.4.5. Sistema interno de protección contra rayo (SPCR_{INT})	60
6.4.6. Protección contra rayos en estructuras con riesgo de incendio y/o explosión	61



6.4.7. Protección contra sobretensiones transitorias	64
6.5. PROTECCIÓN DE INSTALACIONES CONTRA DESCARCAS ELECTROSTÁTICAS.....	84
6.5.1. Peligros ocasionados por la electricidad estática	94
6.5.2. Medidas preventivas y de protección frente al riesgo de la electricidad estática.....	96
Bibliografía	104

6.1. CONCEPTOS BÁSICOS:

Conceptos básicos de incendio:

Temperatura de inflamación: Es la temperatura mínima a la que un líquido inflamable o combustible, en contacto con el aire, desprende la suficiente cantidad de vapor para que se produzca la inflamación de su mezcla con el aire mediante el aporte a la misma de una energía de activación externa.

Temperatura de autoencendido: Es la temperatura a partir de la cual un combustible inicia la ignición de forma espontánea, sin aporte externo de energía de activación.

Límites de inflamabilidad: Concentraciones mínimas y máximas en porcentaje del volumen de vapores de un combustible que permite iniciar una ignición.

Energía mínima necesaria: Es la energía mínima necesaria para la ignición de una mezcla gas-aire en la concentración más favorable.

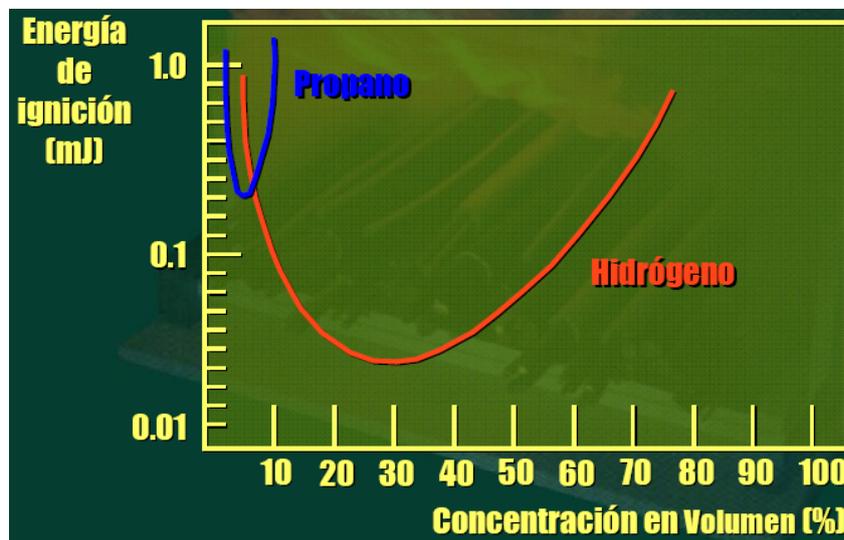


Figura 1 Ejemplos de energías mínimas de activación para el propano y el hidrógeno en función de su concentración en el aire



Energía de activación: Es la energía externa precisa para que combustible y comburente reaccionen.

Tipos de energía de activación:

- Dinámica
- Térmica
- Aportada por los focos de ignición

Clasificación de los focos de ignición:

- Térmico
- Mecánico
- Eléctrico
- Químico

Ejemplos de las causas más comunes de incendio o explosión:

- Llamas
- Chispas (eléctricas, estáticas o de fricción)
- Superficies calientes
- Compresión adiabática

Intervalo de energías de activación necesarias para la ignición

Gases y vapores de líquidos inflamables	de 0,1 a 0,5 mJ
Polvos combustibles	de 10 a 100 mJ
Combustibles sólidos	llamas o superficies calientes

Conceptos básicos de electricidad:

Corriente eléctrica: Es el desplazamiento de cargas eléctricas entre dos puntos que implica una diferencia de potencial o una tensión entre los mismos. Se cuantifica mediante los parámetros: la intensidad de la corriente y tensión eléctrica.

Intensidad de la corriente: Es la cantidad de cargas que en la unidad de tiempo circula por un conductor. La unidad de medida es el Amper (A).

Tensión eléctrica: Es una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos distintos, donde ninguno de ellos tiene que estar conectado a tierra, aunque puede estarlo. La unidad de medida es el Volt (V).

Conductividad eléctrica: Es la propiedad de un material de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de éste. La unidad de medida es Siemens por unidad de longitud; por ejemplo: s.m.

Conductancia: Es el valor de la intensidad de corriente eléctrica que circula a través del elemento de un circuito al aplicar en sus extremos la unidad de tensión eléctrica. La unidad de medida es el Siemens (s).

Resistividad eléctrica: Es la propiedad de un material de oponerse al paso de la corriente eléctrica a través de éste. La unidad de medida es Ohm por unidad de longitud; por ejemplo: $\Omega \cdot m$.

Resistencia: Es la caída de tensión experimentada al circular la unidad de intensidad a través del elemento de un circuito. La unidad de medida es el Ohm (Ω).

Conductor: Es el material o cuerpo hecho de un material de alta conductividad (o baja resistividad). Los metales suelen ser buenos conductores, en especial la plata (Ag), el cobre (Cu) y el aluminio (Al). Se le llama también conductor al material empleado para el transporte de la electricidad.

Aislante: Es el material o cuerpo hecho de un material de alta resistividad empleado para evitar el paso de la corriente eléctrica. Se le denomina también dieléctrico. Los materiales aislantes más usados son: el vidrio, los plásticos, las cerámicas (porcelana), los aceites minerales y el aire.

Corriente de fuga: Si un material aislante no es adecuado para el cometido que realiza, circulan corrientes pueden superar los límites de seguridad y sobrecalentar dicho material.



Circuito eléctrico: Es el conjunto de componentes (conductores, materiales ferromagnéticos y aislantes) ordenados para el aprovechamiento de la electricidad.

Corriente inducida: Es la corriente originada en un circuito por efecto de causas externas al mismo, generalmente, por la variación de campos magnéticos.

Pérdida dieléctrica: Es aquella pérdida que se origina en un aislante sometido a un campo eléctrico alterno y que se manifiesta en forma de calor. Es mayor cuanto más alta es la frecuencia.

Distancia de aislamiento: Es la longitud de un aislante, colocado entre dos elementos conductores, con el fin de evitar que se establezca una corriente eléctrica entre éstos cuando están sometidos a diferentes tensiones.

Borne o terminal: Es un dispositivo que permite establecer un contacto eléctrico fijo y que se instala en un aparato para recibir y conectar un conductor de enlace con el exterior.

Envolvente: Es la cubierta, caja o espacio más o menos cerrado, destinado a contener un aparato o un equipo eléctrico y que lo delimita del exterior. La envolvente protege al equipo de las influencias exteriores, así como al exterior de las influencias propias del equipo.

Corriente continua: Corriente que tiene siempre la misma polaridad, es decir, muestra un polo siempre positivo y otro siempre negativo. Ejemplos de generadores corriente continua de aplicación práctica: los electroquímicos o pilas voltaicas y las máquinas rotativas denominadas dinamo.

Corriente alterna: Se caracteriza por variar constantemente su magnitud, e invertir periódicamente su polaridad. Este tipo de corriente la suministran los alternadores. Básicamente, su forma es sinusoidal. Sus principales parámetros característicos son:

- Período: Es el tiempo que transcurre desde un instante cualquiera hasta que se repite la misma situación.
- Frecuencia: Es la cantidad de períodos que se repiten en 1 s.
- Valor de cresta: Es el máximo valor que alcanza la sinusoide.

- Valor eficaz: Es la raíz cuadrática media de los valores instantáneos que se producen en un semiperíodo.

Generador de corriente alterna: Está compuesto de una o varias bobinas inmersas en un campo magnético. Cuando existe movimiento relativo entre éstos (puede ser uno fijo y el otro giratorio), en los bornes de la bobina o las bobinas aparece una tensión alterna.

Sistema monofásico: Sistema compuesto por varias cargas y alimentado por un generador que dispone de sólo una bobina.

Sistema trifásico: Sistema compuesto por varias cargas y alimentado por un generador que dispone de varias bobinas. Si las bobinas son iguales, en todas ellas se inducen fuerzas electromotrices (f.e.m.) idénticas. Si además las bobinas están desplazadas espacialmente, sus f.e.m resultan desfasadas en el tiempo.

La solución trifásica es el conjunto de tres soluciones monofásicas que, normalmente se conectan entre sí. Según la forma de efectuar dicha conexión existen las siguientes configuraciones:

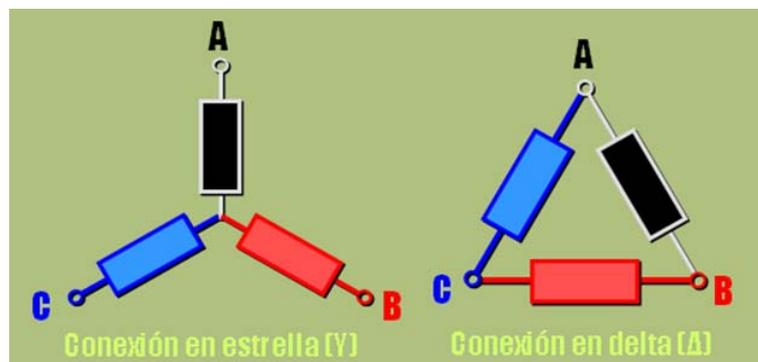


Figura 2 Configuraciones de sistemas eléctricos trifásicos: estrella (Y) y delta (Δ)



6.2. COMPOSICIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Antes de entrar en detalles sobre los riesgos de incendio en una instalación eléctrica, hágase un breve repaso de los términos y funciones de las partes componentes.

Instalación eléctrica: Es el conjunto de aparatos y circuitos asociados para un fin particular: producción, conversión, transformación, transmisión, distribución o utilización de la energía eléctrica.

Las instalaciones eléctricas de acuerdo a su función se clasifican en:

- Instalaciones de producción: Es el lugar donde se produce la energía eléctrica a partir de otro tipo de energía (eólica, hidráulica, térmica, solar, nuclear, etc.).

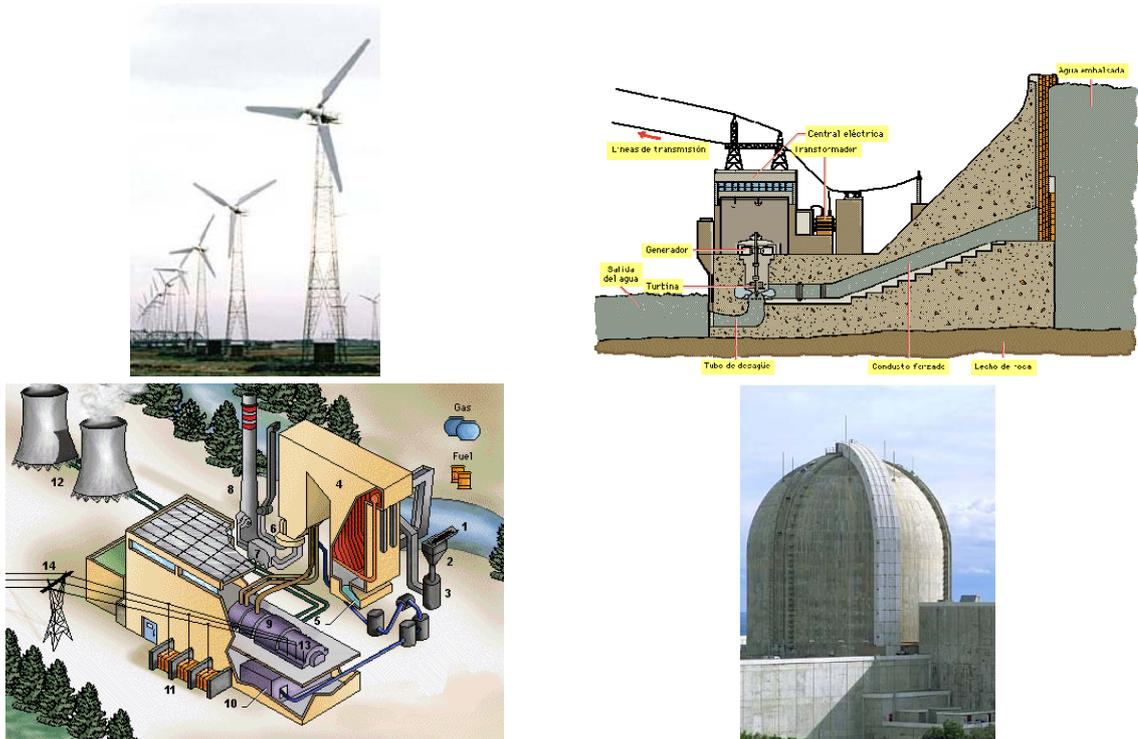


Figura 3 Ejemplos de centrales de producción de energía eléctrica

- Instalaciones de transporte y distribución: Constituidas por las líneas, las subestaciones y los centros de transformación.

- Instalaciones de consumo: Pueden ser:
 - Domésticas
 - Industriales
 - Comerciales

Las instalaciones de consumo constan de los siguientes elementos:

1. Acometida. Parte de la instalación que enlaza la línea de distribución con el cuadro general de protección (punto final de la empresa de suministro eléctrico). Las grandes instalaciones pueden disponer de un centro de transformación propio o una pequeña subestación. Pueden ser: áreas, soterradas o mixtas.
2. Instalaciones interiores. Son las que, alimentadas por una red de distribución o por una fuente de energía propia, tienen como finalidad principal la utilización de la energía eléctrica. Se diseñan e instalan de modo que se alcance el máximo equilibrio en las cargas que soportan los distintos conductores que forman parte de la misma, y éstas se subdividirán de forma que las perturbaciones originadas por las averías que se produzcan en algún punto de la misma afecten a una mínima parte de la instalación. Esta subdivisión deberá permitir también la localización de las averías y facilitar el control del aislamiento de la parte de la instalación afectada. Dispondrán de sistemas de protección contra las sobreintensidades y sobretensiones que por distintas causas pueden producirse para garantizar la seguridad personal y resguardar a sus materiales y equipos eléctricos. Están compuestas por:
 - Cuadros de distribución eléctrica. Es un armario adosado o empotrado en la pared, accesible sólo por el frente y dispuesto con contadores, fusibles, interruptores magnetotérmicos (para la protección contra cortocircuitos) y diferenciales (para la protección contra contactos indirectos). El cuadro eléctrico principal está situado a la entrada de la instalación y distribuido en dos secciones: alumbrado y fuerza. Según el tipo y tamaño de la instalación será necesario o no disponer de cuadros eléctricos secundarios por secciones.



Figura 4 Paneles eléctricos de distribución

- Cableado interior: Está formado por conductos por donde discurren los conductores, generalmente empotrados en tubo rígido o flexible de metal o plástico. Los conductores son los elementos de cobre cubiertos por un material aislante de colores diferentes para facilitar su identificación. Deberán estar convenientemente dimensionados en función de los aparatos a los que sirven, con su aislamiento en perfecto estado y alejados de sitios en que se encuentren materiales inflamables.

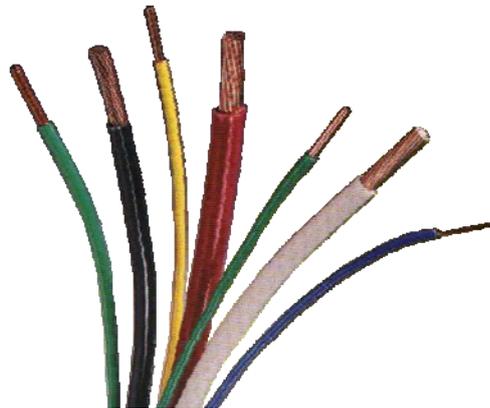


Figura 5 Cables eléctricos

- Tomacorrientes y enchufes: Sirven establecer la conexión de cualquier aparato.



Figura 6 Ejemplos de tomacorrientes y enchufes

3. Toma de tierra: Es la unión entre un conductor del circuito eléctrico de la instalación y todas las partes metálicas que pueden entrar en contacto con los conductores energizados con la tierra, de esta forma protege a las personas y a los equipos. Si se crea un cortocircuito, la corriente encuentra una vía libre a través del conductor puesto a tierra, activando los dispositivos de protección contra sobrecorriente del circuito que no está puesto a tierra, suprimiendo así la situación peligrosa. La impedancia de la vía a tierra debe ser lo suficientemente baja como para que estos dispositivos actúen con rapidez.

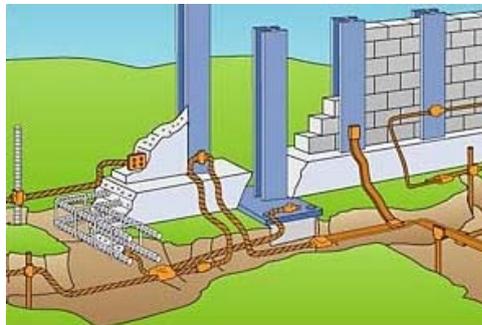


Figura 7 Ejemplo de puesta a tierra

6.2.1. Requerimientos generales de seguridad para las instalaciones eléctricas.

ACOMETIDA:

- Medios de desconexión

- Deben existir medios que permitan la desconexión de todos los conductores interiores de la instalación de los conductores de acometida.



- Los medios de desconexión pueden estar instalados en el interior o en el exterior del edificio, pero siempre en lugar de fácil acceso y lo más próximo posible al punto de entrada de los conductores de acometida.
- En general, un edificio se alimenta de una sola acometida, pero se permite la existencia de acometidas adicionales para las bombas de incendio, los sistemas eléctricos de emergencia, cuando hay grandes cargas instaladas o la superficie que ocupa es superior a la normal.

- Protectores contra sobretensiones

Se requiere de la instalación de protectores contra sobretensiones en los conductores de acometida:

- En los edificios que se alimentan con líneas de transmisión aéreas, que estén ubicados en una zona de alta incidencia de rayos y que contengan aparatos eléctricos
- Cuando el edificio, al cual entran los conductores de acometida, está provisto de sistema exterior de protección contra rayos.
- En instalaciones que contienen equipos electrónicos sensibles a las sobretensiones.
- En los cables de entrada de las antenas de los sistemas de radiocomunicaciones.

CUADROS DE DISTRIBUCIÓN:

- Ubicación:
 - Estar alejados de instalaciones de: agua, gas, teléfono, etc.
 - Tener espacio libre en el frente del mismo.
 - Si son de acceso posterior, dejar detrás un espacio libre de 1m.
 - Tener un nivel de iluminación mínimo de 100 lux
 - En el local donde están ubicados, no debe existir almacenamiento de materiales combustibles o inflamables.
 - Si están en un local especial, la puerta deberá identificarse con Armario Eléctrico Principal y será de material resistente al fuego.
- Material (plástico o metálico). El material de la envolvente de los cuadros deberá cumplir las siguientes características:
 - Rigidez mecánica.
 - No inflamable.
 - No higroscópico.
 - Rigidez dieléctrica.

- Grado de Protección Mínima IP 41: (4) protegido contra objetos de $\varnothing \geq 1$ mm y (1) protegido contra goteo en forma vertical (condensación). Para uso en interiores.
- Consideraciones generales:
 - El acceso a las partes energizadas será sólo posible luego de retirar las tapas o cubiertas mediante una herramienta.
 - No se permite más de dos disyuntores del circuito principal o dos series de fusible para proteger un cuadro de distribución.
 - Ningún componente eléctrico debe montarse sobre la cara posterior y las caras laterales del armario.
 - Los armarios que tengan más de dos circuitos de salida deberán contar con un juego de barras aisladas que permitan conectar o desconectar cada uno de los elementos de protección o mando sin afectar al otro.
 - Tiene que estar identificada la posición de las fases de alimentación.
 - No se permiten la existencia de empalmes para otros circuitos como si fuera una caja de empalmes.
 - Tiene que haber buen apriete en el conexionado de los conductores a los aparatos de protección y maniobra.
 - Dispondrán de una barra de tierra, con la cantidad de bornes suficientes para el número de circuitos de salida, donde se conectarán los conductores de tierra protección (verde- amarillo).
 - Todas las partes metálicas no activas tendrán continuidad eléctrica entre sí y estarán conectadas a tierra.
 - Identificación de circuitos: Los aparatos de señalización, maniobra, protección y medición instalados, deberán estar identificados con inscripciones que permitan saber a que circuitos o zonas de la instalación protegen o controlan (en el idioma nacional).
 - Debe instalarse un dispositivo de protección contra sobrecorriente graduado en todos los conductores de cada circuito y de cada cable de alimentación que no esté puesto a tierra, en los puntos que recibe el suministro.

Los dispositivos de protección contra sobrecorriente están diseñados para limitar la intensidad de corriente que circula por los conductores eléctricos a sus límites de diseño. Una incorrecta selección, puede producir temperaturas excesivas del cable que deteriorarán su aislamiento y, posteriormente, dar lugar a un incendio. Ninguna otra

característica de la instalación eléctrica debería recibir mayor atención y supervisión. Los dispositivos más comúnmente empleados son los fusibles, disyuntores y unidades térmicas de sobrecarga:

- Fusibles

Los fusibles son dispositivos de protección contra cortocircuitos simples, eficientes y económicos. Tienen característica de actuación de tiempo inverso y su fusión hace aparecer automáticamente en el circuito la impedancia necesaria para extinguir la intensidad de fallo.

Éstos son adecuados cuando la intensidad esperada lo funde en el tiempo previsto y, además, su capacidad de corte es suficientemente alta para garantizarlo en el caso de la máxima potencia posible. Sin embargo, no permiten una protección fiable contra sobrecargas, en especial cuando estas son pequeñas.

Permiten una sola actuación. Su reposición presupone de tiempo y de repuesto e implica un riesgo de manipulación. El elemento detector y el de corte son la misma pieza (el hilo o lamina fusible) y puede ser de tipos tapón, lámina, cartucho, etc.

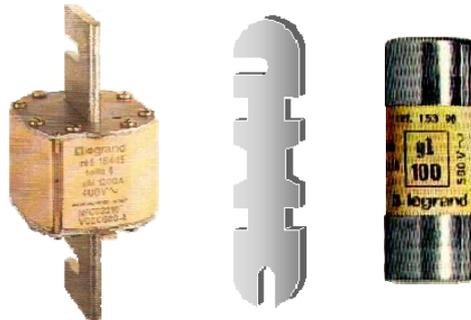


Figura 8 Fusibles

- Interruptores magnetotérmicos

Se eligen de modo que actúen sin más retardo que el impuesto por la inercia de su mecanismo. Existen interruptores que detectan y cortan la intensidad de cortocircuito con una rapidez tal que ésta no puede llegar a alcanzar el valor máximo al que hubiera llegado en caso de no haber intervenido el interruptor.

La protección contra sobrecarga exige que el tiempo de disparo del interruptor sea menor cuanto mayor sea la sobrecarga.

Existen de dos tipos:

- de desconexión ajustable (caja moldeada): Pueden estar sumergidos en aceite o en aire. Se ajusta el punto de desconexión entre los límites máximo y mínimo. Se usan generalmente en grandes instalaciones que tienen personal encargado de su uso y conservación.



Figura 9 Interruptor magnetotérmico de caja moldeada

- de desconexión no ajustable (modular): Es imposible variar su ajuste. Están calculados para que desconecten cuando la corriente exceda su valor nominal. Cuando el mecanismo de desconexión actúa térmicamente, las temperaturas ambientales elevadas pueden reducir la corriente necesaria para que opere.



Figura 10 Interruptor magnetotérmico modular

- Dispositivos térmicos

Se destina para la protección de sobrecorrientes de baja magnitud.

Las protecciones diferenciales son capaces de detectar cuando la corriente, incluso de pequeña magnitud, pasa a tierra a través de alguna vía diferente del conductor apropiado. Cuando esto sucede, se activa en un tiempo lo suficientemente corto, desconectando la instalación y deteniendo la circulación de la corriente al circuito, como para no provocar daños graves a la persona que esté en contacto con una parte activa.



Figura 11 Protector diferencial

Por ejemplo, una protección diferencial de 6 mA entra en acción aproximadamente de 25 ms desde el momento en que la corriente de pérdida alcanza este valor. La clave de este interruptor es la característica de tiempo-corriente.

CABLEADO INTERIOR

Los conductores deben tener la suficiente sección para transportar la corriente de carga previsible.

PUESTA A TIERRA

Los códigos eléctricos exigen la puesta a tierra de:

- partes metálicas expuestas no portadoras de corriente,
- equipos que se conectan con cable y enchufe
- equipos por los que pueda circular corriente, cuando se usa en:
 - emplazamientos peligrosos,
 - lugares húmedos,



- las personas que los manipulan están sobre el suelo, superficies metálicas o funcionan a más de 150 V.
- bastidores metálicos de aparatos de calefacción eléctricos portátiles, estacionarios y fijos
- neveras, frigoríficos, acondicionadores de aire, lavadoras y secadoras de ropa, lavavajillas, trituradoras, equipos eléctricos para acuario, herramientas eléctricas portátiles.
- tubería metálica enterrada de agua, cuyo tramo enterrado exceda 3 m de longitud.
- electrodo de tierra adicional.

6.3. CAUSAS DE INCENDIO DE ORIGEN ELÉCTRICO.

La red eléctrica en el mundo actual constituye un elemento básico de la distribución de energía, que fundamentalmente beneficia el desarrollo y bienestar de las personas. Por el simple hecho de contar con energía eléctrica en un edificio, las personas que permanecen dentro del mismo están expuestas a la amenaza de un incendio eléctrico. Esta amenaza sólo se podría eliminar totalmente si se retirase la red eléctrica, solución poco práctica e irreal, por lo que la electricidad se queda en el edificio y con ella su amenaza.

Se estima que son cientos de miles los incendios que anualmente se inician en los sistemas y aparatos eléctricos de los hogares, industrias, oficinas, almacenes, etc. Miles de personas mueren en estos incendios, decenas de miles se lesionan y, a su vez, el daño material es inmenso. Para mitigar estas nefastas consecuencias hay que estar suficientemente informados: tener una visión general de las causas eléctricas que pueden provocar incendios, conocer los elementos más importantes que constituyen las instalaciones eléctricas y respetar las medidas de funcionamiento y mantenimiento de las dichas instalaciones.

Los incendios de origen eléctrico representan el 11 % de todos de incendios que se producen en edificios. Buena parte de los mismos se debe a errores humanos previsibles o evitables, como son: mala manipulación, falta de mantenimiento, uso inadecuado y poco cuidado del cumplimiento de las normas.

Por estudios estadísticos se conoce que un 90 % de los incendios de origen eléctrico se producen en las redes de baja tensión y que los porcentajes de incidencia de los componentes de una instalación eléctrica en el incendio se distribuyen de la siguiente manera:

- 31 % en cables y canalizaciones
- 30 % en motores
- 21 % en empalmes, derivaciones y bornes
- 11 % en componentes de las instalaciones y aparatos de utilización.
- 7 % por causas diversas

6.3.1. Causas eléctricas de incendio

Para que se produzca el fuego es necesaria la presencia, además del combustible y el comburente, de una energía externa de activación. El riesgo principal de incendio que suponen las instalaciones eléctricas es su potencial como fuentes de ignición.

Entre estos tipos de energía están las aportadas por fuentes de ignición tales como:

- calentamiento excesivo como resultado de sobreintensidades o sobretensiones
- formación de arcos eléctricos



Figura 12 Fuentes de ignición de tipo eléctrica

Por tanto, la electricidad puede convertirse en un peligro cuando los aparatos eléctricos se calientan en exceso o producen arcos. La elevación de la temperatura puede incendiar cualquier material combustible que se encuentre en sus cercanías. El arco eléctrico puede hacer que entren en ignición el aislante del conductor o el material combustible que se encuentre en las proximidades y fundir el material del conductor.

Efecto Joule

En un determinado dispositivo conductor la energía calórica producida depende de la intensidad y duración de la corriente que circula por éste. Cuando un conductor eléctrico lleva corriente, se genera calor en proporción directa a su resistencia y al cuadrado de la intensidad. La resistencia de los conductores empleados para transportar la corriente hasta el punto de utilización debe ser lo más baja posible. Para este fin se usan metales como la plata, el cobre y el aluminio.

Por tanto, la causa que lo produce es:

- Sobreintensidad. Es la corriente cuya intensidad excede el valor máximo para el cual está diseñado un circuito o aparato y que produce un calentamiento peligroso. Es un fenómeno anormal que implica que se supere el equilibrio térmico entre el calor generado y el cedido al ambiente y tiene lugar debido a: una sobrecarga o un cortocircuito.

Una sobreintensidad permanente, aunque sea relativamente moderada, puede conducir a calentamientos inadmisibles para el propio material u otros que se hallen próximos. La situación más peligrosa se da cuando, a causa de un fallo o una avería, si no se encuentra el circuito debidamente protegido, se alcanzan valores de varias veces la intensidad nominal.

Las sobreintensidades perjudiciales pueden deberse a las siguientes situaciones:

- Sobrecargas: $I > I_n$ (generalmente: $I < 4 I_n$)
- Cortocircuitos: $I \gg I_n$
- Defectos no francos: $I_{\text{defecto}} \ll I_{\text{cc máx}}$
- Contacto o conexión defectuosa: $I \geq I_n$

Arco eléctrico

El arco es un camino conductor compuesto de iones disociados a alta temperatura. Los iones que forman el camino conductor (plasma) proceden de los electrodos entre los cuales salta el arco y del medio ambiente, generalmente aire. Se caracteriza por tener asociado elevadas temperaturas. La duración está condicionada por el valor de la corriente. Si la intensidad es suficiente para activar los dispositivos de protección, la duración es de unos pocos ms. En caso contrario, permanece hasta que la falla evoluciona hasta un franco cortocircuito, con intensidad suficiente para provocar el disparo de las protecciones.

El arco eléctrico, controlado o no, constituye una fuente de calor. Su sección suele ser muy pequeña, de forma que el volumen también lo es, y dada la baja densidad, rápidamente alcanza temperaturas muy elevadas.

El arco es especialmente peligroso si se presenta de forma incontrolada, por ejemplo, en casos de averías o cortocircuitos y siendo entonces aleatoria su localización.

Estas causas a su vez tienen su origen en los siguientes aspectos:

- Sobretensión. Una sobretensión es un cambio en las señales de tensión durante tiempos relativamente cortos debido a las variaciones en las condiciones de operación de un sistema eléctrico.

Las sobretensiones pueden clasificarse por su tipo en:

Sobretensiones electrostáticas	Liberación de cargas eléctricas que se acumulan en las partes conductoras de puntos o superficies donde se producen rozamientos (como bandas transportadoras y tolvas) si están aisladas respecto a otras cercanas.
Sobretensiones temporales	Desviaciones no deseadas de las señales de tensión que ocurren generalmente a la frecuencia industrial. Generalmente son originadas por fallas a tierra, resonancia, ferro-resonancia o pérdida súbita de carga.
Sobretensiones transitorias	Evento que es indeseable, de naturaleza no permanente y asociado con los cambios de estado estable de los parámetros eléctricos de tensión y corriente. Pueden deberse a: <ul style="list-style-type: none"> ▪ operaciones de conmutación ▪ interacción entre sistemas ▪ impulso electromagnético del rayo

Las sobretensiones por su origen, en:

- internas (sobretensiones de maniobra)
 - externas (sobretensiones debidas a rayos) captadas por las líneas eléctricas o de telecomunicaciones, especialmente si son aéreas.
- Fallo de aislamiento. Puede ser superficial (debido a la contaminación “polvo-humedad” y cuyo proceso se inicia generalmente con un contorno de intensidad

creciente) o volumétrico. Los daños de aislamiento son producidos por agresores puntuales como:

- perforaciones producidas por aristas o elementos cortantes del propio material,
 - agresiones exteriores: golpes, paso de vehículos, acción de picos frecuentes en instalaciones exteriores.
 - roturas por: esfuerzos dinámicos producidos por la propia corriente, tensiones mecánicas permanentes de la propia instalación, vibraciones, fijaciones excesivamente apretadas o tensadas, contracción progresiva de resinas aislantes.
 - desgaste por rozamiento continuado
 - agresión térmica a cubiertas y aislantes termoplásticos
 - agresión química en presencia de disolventes, vapores de gases halógenos, etc.
 - agresión biológica producida por roedores, bacterias y mohos.
-
- Fusión de un elemento conductor. Producida por la circulación de una corriente de intensidad muy elevada a través de un elemento metálico de sección pequeña, lo que lo lleva a alcanzar su temperatura de fusión, momento en que la conducción se mantiene en forma de arco por la tensión de la red, apoyándose en superficies pequeñas en cuyos puntos se alcanza la temperatura de ebullición de los metales, incrementando la ionización.

 - Arcos eléctricos en equipos. Se producen en máquinas eléctricas de soldar, lámparas de arco, bisturís eléctricos, etc. Las partículas incandescentes de dichos arcos pueden alcanzar sustancias inflamables que estén en las inmediaciones.

 - Rotura de conductores. Desplazamiento errático de conductores energizados, que entran en contacto con piezas metálicas que se encuentran a otra tensión eléctrica como consecuencia de la rotura de un conductor o de la desconexión fortuita o provocada de sus bornes.

 - Defecto progresivo. Evoluciona más o menos rápidamente, pero suele llevar finalmente al cortocircuito y de éste, a la posibilidad de incendio. Entre éstos pueden considerarse:
 - debilitamiento por fatiga mecánica sostenida
 - absorción paulatina de humedad

- envejecimiento
- corrosión química
- acumulación de suciedad
- desgaste por rozamiento

- Contacto defectuoso. Anomalía que genera un exceso de calor, normalmente progresivo, que puede desencadenar en un cortocircuito, pero que a menudo puede generar el incendio antes de llegar a ese extremo. Suele presentarse en puntos de unión eléctrica entre piezas conductoras. En estos puntos siempre hay una resistencia de contacto, dependiente del apriete mecánico entre los mismos y del estado de las superficies entre las cuales se establece, que produce una pérdida que se manifiesta en forma de calor.

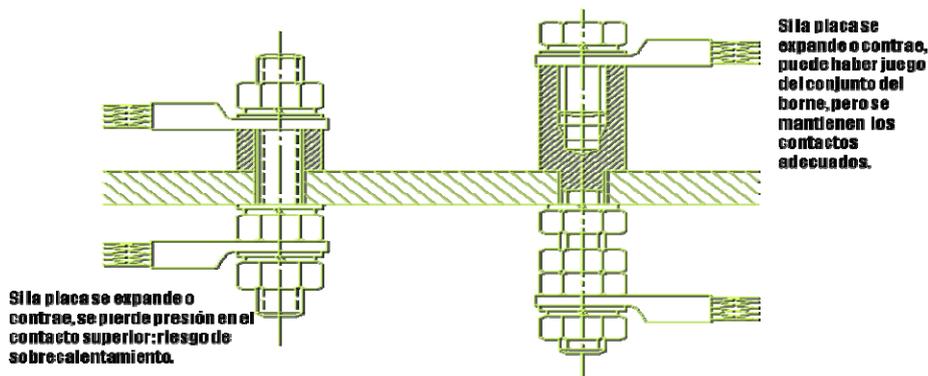


Figura 13 Ejemplos de contactos

- Falta de ventilación. Todo material eléctrico por el cual circula una corriente presenta pérdidas que se convierten en calor. Este tiene que ser disipado para que la temperatura de los componentes se mantenga dentro de los límites previstos. Si la ventilación es deficiente, el material se calienta más de lo permitido, con el consiguiente fallo más o menos prematuro. Puede ser por un defecto de instalación, pero a menudo se debe a la acumulación de suciedad y cuerpos extraños sobre el propio material.
- Motor calado. Aquel que está detenido porque el par resistente es superior al par motor, es decir, que no puede con la carga que se le ha impuesto y se detiene o no puede arrancar. Ejemplos de causas: exceso de carga en la máquina, defecto mecánico

en la misma máquina, desajuste del freno, defecto en la alimentación eléctrica, defecto interno en el motor. En un motor calado el ventilador no ejerce acción alguna, la temperatura aumenta rápidamente, de manera que sólo puede soportarse por unos pocos segundos.

- Fallo de una fase. En los sistemas trifásicos a veces se produce el fallo de una fase procedente de la red exterior, de la instalación interior o de alguna de sus ramificaciones, por haber actuado un fusible. En esta situación el sistema se comporta como monofásico y tiene las siguientes consecuencias negativas:
 - en el caso de un motor trifásico en marcha, este sigue girando pero hay un incremento de intensidad en las otras dos fases; si estaba a plena carga, puede calentarse anormalmente y llegar a quemarse.
 - en el caso de un motor monofásico detenido, éste puede no arrancar y se produce el calado.
 - en el caso de un motor monofásico, si la fase que falla queda sin tensión y el motor está detenido, puede que no arranque y se mantenga calado.
 - en el caso de otras alimentaciones monofásicas (electroimanes, embragues, circuitos de mano o de señalización), si la fase que falla queda sin tensión se desconecta y si presenta una tensión reducida, es posible que se quemen o actúen descontroladamente y ello de lugar a averías.

- Agua o humedad. Facilitan la aparición de corrientes de fuga que, con la presencia de materiales carbonizantes o inflamables, dan lugar fácilmente a la formación de caminos conductores, de cortocircuitos o de incendios. Estas condiciones se presentan especialmente en cocinas, lavanderías, lecherías, industrias de la alimentación y en instalaciones a la intemperie.

- Protecciones inadecuadas. Las protecciones pueden ser inadecuadas debido a las siguientes causas:
 - elección errónea
 - elección correcta pero no ajustada al valor de disparo
 - desajuste con las fatigas, vibraciones, envejecimiento, suciedad, deformación, falta de mantenimiento.

- desajuste por choque mecánico o eléctrico, por ejemplo: por haber sufrido un cortocircuito.
- Defecto mecánico. Se producen desgastes, grietas, roturas, deformaciones y aflojamientos que suelen conducir a contactos defectuosos o a cortocircuitos. La suciedad y la presencia de cuerpos extraños pueden constituir un defecto mecánico o conducir al mismo. Los malos tratos que sufre el material durante su transportación, instalación y servicio, dan lugar a roturas o deformaciones, con la consiguiente reducción de la protección y de las distancias de aislamiento, que favorecen la formación de cortocircuitos.

Otras causas

- Utilización inadecuada del equipo. Cuando no se respetan las indicaciones del fabricante o las normas de uso; por ejemplo: la separación entre los aparatos de alumbrado y materiales inflamables, ventilación obstruida en los equipos. Los equipos aprobados y certificados por laboratorios acreditados rara vez originan incendios si se emplean de acuerdo a sus especificaciones y se reemplazan oportunamente, pero la no utilización de los mismos de acuerdo con las condiciones de su aprobación puede dar lugar a incendios. Los casos más destacados de mal uso se producen en los aparatos de calefacción, motores eléctricos y cables de extensión. Existen todavía instalaciones muy antiguas que están fuera de normativa y que no cumplen con las medidas mínimas de seguridad en cuanto al lugar por donde discurren y a su dimensionado, lo que provoca numerosos incendios.
- Fallo interno en los aparatos de utilización. Fallos en los dispositivos térmicos de regulación o limitación de la temperatura, cables flexibles de aparatos móviles.
- Instalación incorrecta. Mala instalación del cableado eléctrico que produce cortocircuitos o fugas a tierra. El incumplimiento de las especificaciones de mano de obra en la instalación de los equipos establecidas en los códigos eléctricos hace que se produzcan sobrecargas, daños a los propios equipos o excesiva exposición al calor de combustibles en las cercanías.



- Mala ubicación de motores. Generalmente se ubican en locales remotos, reciben poco mantenimiento y funcionan en períodos en que la instalación no está atendida. El fuego puede propagarse desde el motor hasta los depósitos de aceite u otros combustibles cercanos.
- Diseño inadecuado de interruptores. Si los interruptores no están correctamente diseñados y no reciben un mantenimiento pueden causar incendios. Los interruptores de aceite o cortacircuitos representan un peligro adicional, debido al líquido combustible con el cual se rellenan.
- Ambientes peligrosos. Ambientes peligrosos para el buen funcionamiento de los equipos eléctricos por su carácter químico corrosivo, por su riesgo de inflamación o de explosión. En éstos el material eléctrico suele incrementar el riesgo por sus superficies calientes y por su capacidad de generar chispas tanto en su funcionamiento normal como en caso de averías. Se encuentran en industrias químicas y del petróleo, en las plantas productoras de gas, fábricas textiles y de confección, productoras y manipuladoras de explosivos, fósforo y productos pirotécnicos, en las estaciones de servicio, los almacenes y los silos de grano.
- Falta de mantenimiento: El desgaste de los equipos y los cables por su utilización continuada durante una determinada cantidad de años, es el responsable del mayor porcentaje de incendios eléctricos de causa conocida. El envejecimiento de los equipos eléctricos da por resultado el deterioro de sus materiales aislantes y, en algunos casos, la corrosión o fatiga de los propios conductores.
- Modificaciones de la instalación: Sobrecargas por ampliaciones de potencia sin modificar las instalaciones existentes.

6.3.2. Comportamiento ante el fuego del aislamiento de los conductores.

Los cables, en su uso normal, no producen chispas, arcos ni temperaturas elevadas, pero es bien conocido el riesgo que se presenta cuando existen importantes cantidades de cables agrupados y, por motivos externos, se produce una situación de incendio. En estas

condiciones, la materia aislante de los cables eléctricos puede constituir un alimento para el fuego y propagar el mismo a todo lo largo de su tendido.

Aunque la propagación del fuego es un riesgo importante, no es el único peligro. Hay que tener en cuenta otros riesgos, como el desprendimiento de humos densos y de gases tóxicos y corrosivos, producto de la combustión de la materia aislante.

En caso de incendio o catástrofe de cualquier tipo, los cables, ya sean de energía eléctrica o de telecomunicaciones, deben ser capaces de no originar o propagar el incendio y además mantener el servicio a pesar del aumento de temperatura, la presencia de llamas, etc.

Los códigos eléctricos especifican las corrientes máximas que se pueden transportar con seguridad por los conductores sin sobrecalentarse. Estas dependen de las dimensiones del conductor, del tipo de aislamiento y del método de alambrado. Si se exceden las condiciones especificadas, la generación de calor se convierte en un riesgo por dos razones:

- Deterioro del aislante del conductor
- Exceso del calor generado

Los aislantes eléctricos deben estar diseñados para limitar los daños mecánicos y evitar chispas, pero no para impedir la disipación de calor. La acumulación de ciertas materias sobre los cables, puede producir fallos de aislamiento que pueden dar lugar a cortocircuitos y a la propia combustión de esas materias.

Los cables presentan las siguientes características relativas al riesgo de incendio:

- Contienen gran porcentaje de material inflamable o combustible en contacto o muy cerca de las partes conductoras en las cuales se genera el calor.
- Las sobrecorrientes afectan el cable en toda su longitud
- Aislamientos con formulaciones a base de PVC, que en la mayoría de los casos contienen aceites plastificantes.

Al aumentar la temperatura estos, aceites del PVC tienden a evaporarse. Si estos vapores entran en contacto con una chispa o llama pueden inflamarse, generando más calor.

El PVC se ablanda, cede y a temperaturas más altas gotea. Por insuficiencia de aislamiento pueden venir cortocircuitos. El PVC en contacto con el fuego se inflama generando gran cantidad de gases tóxicos y corrosivos. El PVC al arder y descomponerse, el 30 % de su peso se convierte en ácido clorhídrico, cuyos efectos perniciosos se manifiestan rápidamente sobre el resto del equipamiento eléctrico.

Los peligros de propagación de la llama y del incendio son más pronunciados en los tendidos verticales, inevitables en edificios de pisos.

La protección del cable contra la excesiva generación de calor en su interior se consigue disponiendo protecciones eléctricas de tipo térmico, magnético o combinado que impida el paso de una corriente superior a la que puede soportar el cable antes de que pueda ser seriamente afectado. La protección del cable contra el calor procedente del exterior, es decir, de un incendio ya declarado, es posible con recorridos exteriores y en ambientes amplios a los que tengan acceso las personas y los equipos de extinción convencionales.

En el caso de los cables de fibra óptica, y particularmente los dieléctricos, al carecer de elementos metálicos nunca podrán ser la causa inicial del fuego ni presentarán riesgo de descargas, inducciones, etc., pero -si no son correctamente seleccionados- pueden colaborar a su propagación o sufrir sus consecuencias:

Estos serían los riesgos catastróficos a evitar:

- Propagación del incendio: las cubiertas o algunos de los componentes del cable pueden ser transmisores de la llama.
- Generación de humos: en caso de incendio los humos generados por la combustión del cable o sus componentes pueden ser altamente corrosivos, con lo que producirán daños complementarios a las instalaciones, tóxicos con el consiguiente peligro si son inhalados por las personas u opacos que impidan la visibilidad o la reduzcan muy sensiblemente.

- Interrupción de la comunicación: este es un peligro no menor que los anteriores, pues puede ser la causa de cierre o no apertura de puertas, no accionamiento de alarmas o dispositivos de emergencia, etc.

Por todo esto, para que un cable sea absolutamente seguro al ser instalado en interiores, en túneles, en locales de pública concurrencia o en instalaciones industriales con requerimientos especiales de seguridad (minas, parques petrolíferos o de transporte, etc.), deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Resistente a la llama
- No emisor de humos tóxicos, peligrosos u opacos en caso de incendio.
- No propagador del incendio.

Resistencia a la llama:

Un cable resistente al fuego es el que continúa su funcionamiento normalmente durante y después de un fuego prolongado, suponiendo que la magnitud del fuego sea suficiente para destruir los materiales aislantes en la zona donde se efectúa la prueba.

Se han desarrollado formulaciones en PVC que permiten retener en las cenizas un buen porcentaje de cloro, con una emisión de ácido clorhídrico de la mitad del volumen que se desprendía en los cables precedentes.

Para la seguridad personal, en ambientes con elevada concentración de personas, la solución que se aplica es la utilización de formulaciones especiales que, en combinación con el oxígeno, no puedan emitir gases corrosivos o tóxicos y la emisión de humos se reduzca grandemente.

Uno de los mayores riesgos potenciales proviene de la combustión del carbono que, en condiciones de escasa aireación, puede originar monóxido de carbono, mucho más tóxico que el dióxido de carbono. Los nuevos cables, cuando se queman, lo hacen muy lentamente, por lo que la proporción de monóxido de carbono que se genera es muy limitada respecto al dióxido de carbono.

Los cables, en función de su comportamiento en relación con los riesgos de incendio, se subdividen en las siguientes categorías:

- Cables no propagadores de la llama. Son cables que, tomados individualmente, no propagan la llama y se autoextinguen en breve tiempo a corta distancia del punto en el cual ha sido aplicada la llama. Esta característica garantiza que un cable tomado solo, si se incendia ocasionalmente, no propagará la llama para cebar un incendio.
- Cables no propagadores del incendio. Son los cables que, incluso cuando se instalan en haces, no propagan el incendio y se autoextinguen a distancia limitada del punto en el cual se ha desarrollado el incendio.
- Cables resistentes al incendio. Son cables que han de prestar servicio bajo llama durante tiempos relativamente largos, asegurando su normal funcionamiento durante y después de un incendio. Esta propiedad suele lograrse con formulaciones o tratamientos con materiales aislantes inorgánicos. Generalmente estos cables se utilizan para alimentan servicios imprescindibles (por ejemplo: de alumbrado, de detección y extinción de incendios, de señalización para la evacuación de las personas, de bombeo de agua u otros servicios de seguridad).
- Cables con desarrollo limitado de gases tóxicos. Ante el problema de corrosión y toxicidad asociado a la emisión de elevadas cantidades de ácido clorhídrico, se han desarrollado nuevos tipos de cable en los que se presenta este fenómeno de manera reducida.
- Cables con bajo desprendimiento de humos. Los cables de este tipo desprenden, en caso de incendio, gases de muy baja opacidad, con lo cual se garantiza atenuar el oscurecimiento producto de la combustión del material.

6.3.3. Medidas de protección contra el fuego para conducciones eléctricas.

Es posible proporcionar una protección efectiva contra el fuego de las conducciones eléctricas por varios métodos:

- Protección contra el fuego de los cables instalados.

- Obturadores o cortafuegos, acoplables a cualquier tipo de orificios de paredes o techos, horizontales o verticales, de pequeñas áreas o de varios m².
- Paredes de separación y compuertas contra el fuego, adaptables a los túneles de suministro eléctrico.

Protección de los cables instalados

El producto protector que cubre los cables tendrá que reunir las siguientes características:

- Aplicarse con facilidad mediante atomizador convencional y preferiblemente en una sola operación.
- Retardar el fuego y el calor, retrasando los daños y cortocircuitos en un cable, incluso durante el fuego intenso, y prevenir la propagación de las llamas en las direcciones horizontales y verticales.
- No reducir la capacidad de conducción eléctrica de los cables.
- No contener disolventes que sean inflamables.
- No provocar daños en los forros de los cables.
- No estar formulado con productos que sean tóxicos para las personas que lo apliquen.
- Ser suficientemente flexible para absorber los movimientos de los cables por la variación de temperatura y permitir la manipulación sin que se rompan o agrieten.
- Ser resistente a la intemperie, para poder utilizarlo en exteriores.
- Ser duradero.

Obturadores

Colocación de barreras cortafuegos en todas las perforaciones practicadas en las paredes y pisos para permitir el paso de los cables. El método consiste en rellenar la abertura con una lana mineral y después aplicar una capa del producto de 2 cm de espesor a cada lado de la lana.

En aberturas grandes, la protección consiste en paneles de lana mineral cubierta con una capa resistente al fuego, aplicada mecánicamente, y una superficie elástica que pueda absorber el movimiento de los cables causados por la temperatura. Estos paneles



simplemente se cortan al tamaño de la abertura y se instalan utilizando el material de sellado de las ranuras.

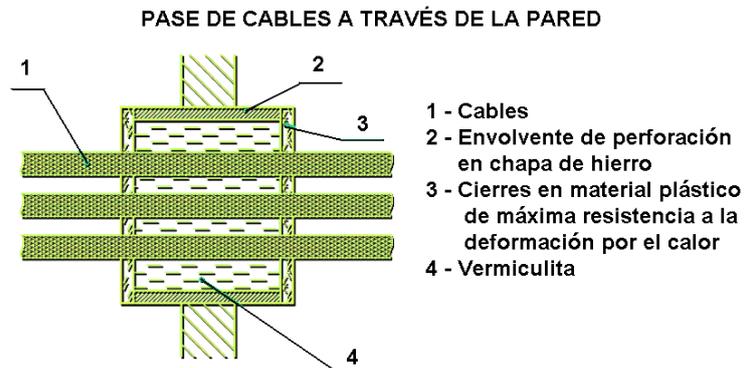


Figura 14 Obturador en pared

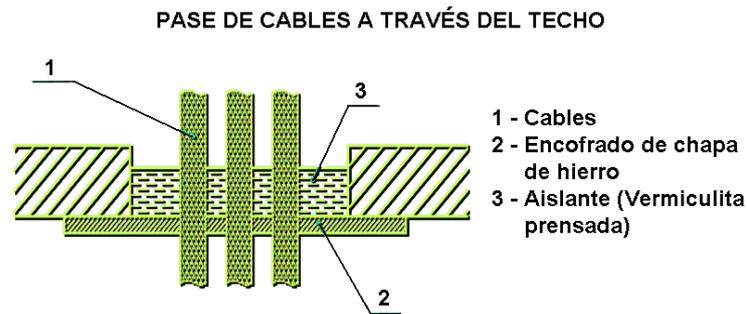


Figura 15 Obturador en techo

Protecciones contra sobrecargas

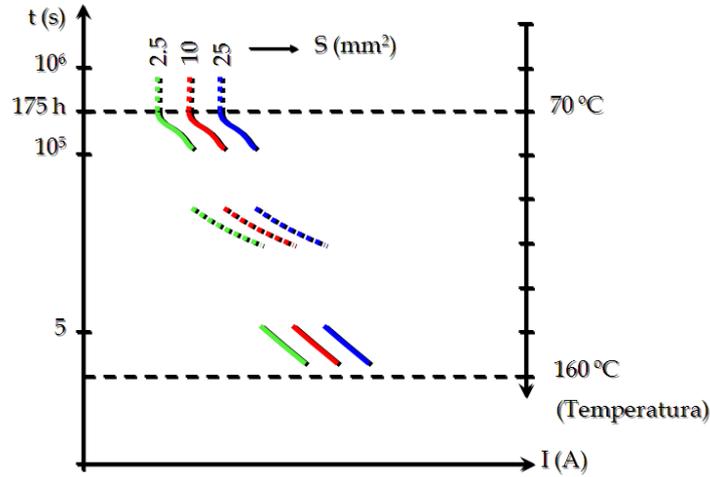
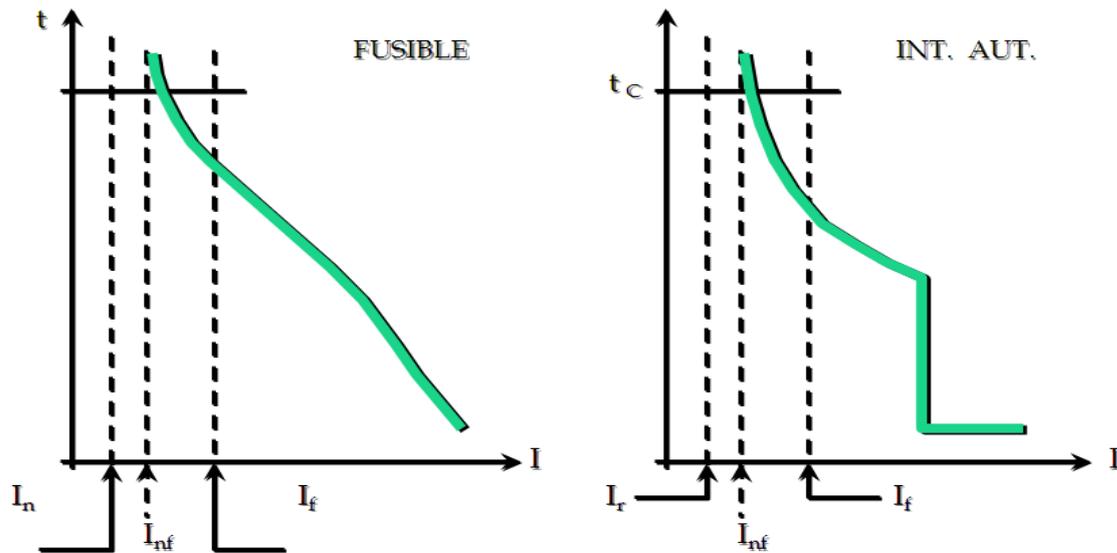


Figura 16 Curvas de temperatura de cables de cobre de diversos calibres y aislamiento de PVC.



I_n, I_r : Intensidad nominal o de regulación.

I_{nf} : Intensidad convencional de no funcionamiento (intensidad especificada que el dispositivo puede soportar sin abrir durante el tiempo convencional t_c)

I_f : Intensidad convencional de funcionamiento (intensidad especificada que provoca el funcionamiento del dispositivo en un tiempo inferior o igual al tiempo convencional t_c)

Figura 17 Curvas de funcionamiento de fusible e interruptor automático

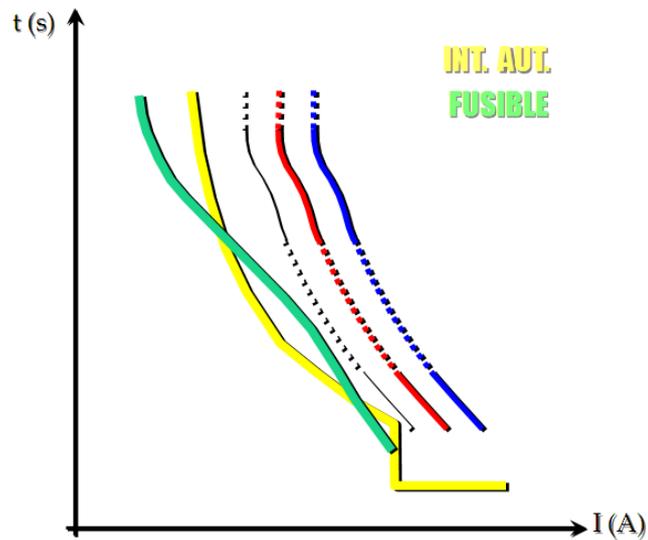


Figura 18 Superposición de las curvas para la determinación de existencia de protección.

Protecciones contra cortocircuitos

Los cortocircuitos están asociados con arcos eléctricos; por tanto, deben despejarse cuanto antes. Tienen que controlarse las dos situaciones extremas siguientes:

- Cortocircuito máximo producido en las inmediaciones del dispositivo de protección (I_{cc} máx.).
- Cortocircuito mínimo, producido en los bornes del aparato de utilización más alejado, amortiguado por impedancia de la línea interpuesta (I_{cc} mín.).

La causa más frecuente de incendios causados por las canalizaciones es la deficiente protección contra estos dos tipos de cortocircuitos.

También existen:

- Cortocircuitos resultantes de la evolución de defectos a tierra por fallos de aislamiento
- Cortocircuitos de fase a tierra o entre fases producidos por sobretensiones.

Los dispositivos reglamentarios de protección contra cortocircuitos son: fusibles y los interruptores automáticos.

Además la situación puede agravarse si la perforación del aislamiento y el cortocircuito se producen en los bornes de entrada del dispositivo de protección general, ya que es el primero que está sometido a la sobretensión, pues en tal caso dicho dispositivo no puede interrumpir la sobreintensidad y el riesgo de incendio es inmediato.

Para prevenir esta posibilidad se deben utilizar dispositivos de protección contra sobretensiones seleccionados y situados convenientemente.

6.3.4. Minimización de los riesgos de incendio en instalaciones eléctricas

Un porcentaje alto de las instalaciones que sufren incendios de proporciones catastróficas no pueden reanudar sus operaciones. Para evitar pérdidas personales o económicas en su negocio, se sugiere examinar cuidadosamente los procedimientos reconocidos para mantener los aparatos eléctricos en condiciones de operación segura y confiable.

Acciones a tomar para evitar incendios de origen eléctrico.

Para lograr minimizar los riesgos de incendio inherentes a las instalaciones eléctricas, se deben perseguir los siguientes objetivos:

- Realización de inspecciones periódicas y mantenimientos preventivos en las instalaciones, de acuerdo a la reglamentación vigente.
- Disponer de personal altamente calificado para las labores de mantenimiento.
- Adaptar las antiguas instalaciones a la nueva reglamentación para hacerlas más seguras.

Inspecciones periódicas:

- Instalación
 - Cables húmedos y mojados
 - Cables en contacto con soluciones corrosivas y vapores
 - Cables en contacto con aceites y grasas
 - Cajas y herrajes flojos
 - Aislamiento débil
 - Cables sin protección agrupados en cajas de empalmes, cajas derivadoras, conductos y cajas de registro.

- Presencia de polvo abrasivo y conductor o astillas metálicas sobre el equipo.
- Cable aislado tibio al tacto
- Instalación de tomacorrientes adicionales sin aumentar el calibre del cableado.

Lo que se debe buscar:

- Sistema sujeto a avería mecánica.
 - Mano de obra y mantenimiento deficientes.
 - Calor y humedad excesivos cerca del equipo eléctrico.
 - Vibración excesiva.
 - Cableado temporal utilizado donde se necesita una instalación permanente.
 - Sobrecarga de los circuitos.
 - Deterioro causado por años de uso, aceites, ácidos y solventes.
- Motores y generadores
- sobrecarga
 - funcionamiento muy frecuente, sacudidas
 - espacios de ventilación obstruidos
 - motores trifásicos alimentados con una sola fase por falso contacto en los controles o fusible abierto
 - suciedad, aceite, humedad, envejecimiento o fallos mecánicos que dañan el enrollado
 - mala alineación del motor
 - vibración excesiva
 - aislamiento gastado o empapado en aceite
 - chipas en motores con colector
 - ausencia de protecciones contra sobrecorriente
 - utilizar equipo eléctrico aprobado para uso en ubicaciones peligrosas debido a la presencia de líquidos inflamables, gas, polvo o materiales corrosivos si una operación particular demanda.
- Interruptores y controles
- Conexiones flojas en los terminales que causan calentamiento y arcos
 - Partes flojas que producen cortocircuitos o fugas a tierra

- Arco excesivo por contactos quemados, aceite bajo o sucio en interruptores y condensadores de arranque
 - Cortocircuitos por entrada de agua, aceite o suciedad en las cajas de los interruptores
 - Uso de interruptores ordinarios en lugar de a prueba de explosión
 - Fusibles o cortocircuitos en malas condiciones mecánicas.
 - Capacidad de interrupción inadecuada para cableado existente
 - Recintos a prueba de explosión sin tapas, tapas mal encajadas o dañadas, huecos descubiertos en las cajas de interruptores
 - Vibraciones fuertes que aflojan las conexiones
 - Ausencia de tapas ajustadas y aseguradas por cerradura
 - Colocación de puentes en sustitución de fusibles quemados.
- Lámparas, transformadores, elementos
- Ausencia de pantallas en lámparas que pueden tener contacto con combustibles o romperse por contacto físico.
 - No uso de lámparas antideflagrantes en zonas con abundantes vapores combustibles
 - No uso de lámparas estancas en zonas con polvos combustibles
 - Recalentamiento de balastos de tubos fluorescentes
 - Recalentamiento de otros transformadores

Mantenimientos preventivos:

El costo del mantenimiento preventivo es pequeño comparado con el costo de reparación de daños extensos y con el elevado costo por tiempo de interrupción de las operaciones. El aislamiento del cableado se seca y se deteriora; los receptáculos se aflojan y se desgastan con el transcurso del tiempo. La acumulación de suciedad, aceite y residuos en motores, transformadores y otros equipos eléctricos produce sobrecalentamiento.

Un programa de mantenimiento planeado y organizado debe incluir lo siguiente:

- Mantener el equipo limpio, seco y libre de fricción.
- Realizar inspecciones frecuentes para detectar señales de calentamiento.
- Lubricar los cojinetes y partes móviles con regularidad y apropiadamente.
- Mantener los dispositivos de protección en buenas condiciones de funcionamiento.



- Verificar las capacidades nominales o configuraciones para asegurarse que sean las correctas para el cableado o equipo.
- Establecer un programa de mantenimiento para los equipos importantes.
- Evaluar periódicamente el programa de mantenimiento para determinar si está logrando los resultados deseados.

Personal cualificado:

El programa debe estar a cargo de personal cualificado, familiarizado con los sistemas eléctricos así como también con las instrucciones del fabricante de equipo.

6.4. PROTECCIÓN CONTRA RAYOS.

Debido a que nuestra sociedad es cada día más dependiente de las redes de energía eléctrica y de información, de los equipos de cómputo y en general, de los equipos eléctricos y electrónicos, el diseño y la protección de éstos contra los efectos de los rayos es hoy una tarea de primera necesidad.

Para comprender como funciona la protección contra el rayo y cual sistema es más apropiado para las diferentes aplicaciones, se necesita hacer un repaso del fenómeno.

Fenomenología del rayo.

Durante una tormenta, se produce una separación de cargas dentro de la nube. El potencial en la base de la nube crece y eleva el campo eléctrico sobre la tierra. Dicha separación de cargas usualmente deja la base de la nube con carga de una polaridad, induciéndose otra similar de polaridad contraria en la superficie de la tierra debajo de ésta de aproximadamente la misma forma y tamaño. Este proceso dura hasta que el aire entre la nube y la tierra no puede actuar como aislador.

Cuando la nube está suficientemente cargada se forman chispas de baja intensidad llamadas líderes de paso, que se mueven desde la base de la nube con arranques y paradas sucesivas acercándose a tierra e ionizan una trayectoria en el aire. Cerca de la superficie terrestre se van generando puntos de acumulación de cargas positivas. El campo eléctrico dentro de la zona es tan alto que crea trazadores ascendentes desde los objetos en tierra. El primer trazador que alcanza el líder de paso cierra el circuito nube-tierra y comienza el proceso de neutralización de cargas.

La neutralización de cargas (el rayo) es causado por el flujo de electrones de un cuerpo a otro, tal que se anule diferencia de potencial existente entre los dos cuerpos. Se produce en este momento la primera descarga rápida desde la tierra a la nube, transportando gran cantidad de carga en el canal en un tiempo muy pequeño. En ese instante, la energía electrostática se transforma en energía electromagnética.

Posteriormente aparece una segunda descarga rápida (menos energética que la primera), que baja de una sola vez de forma no pulsante, y así sucesivamente hasta unas 4 como promedio.

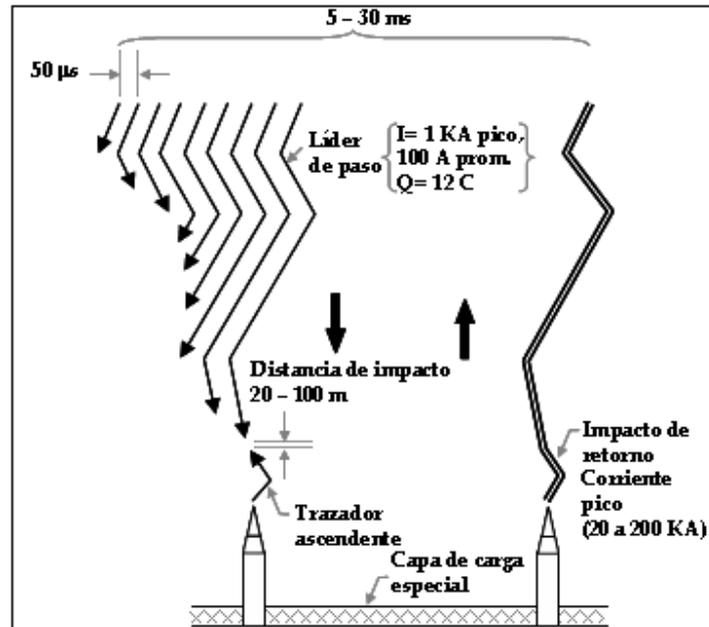


Figura 19 Proceso de la descarga de rayo

Aunque los rayos son altamente variables en sus parámetros, se pueden generalizar que:

- Suelen venir asociados con fuertes corrientes ascendentes y precipitación, por lo que están relacionados con nubes de tipo cumulus-nimbus.
- Las observaciones revelan que son más frecuentemente entre 60° N y 60° S.
- La mayoría de éstos se observan en nubes con contenido de gotas de agua y de hielo.

Efectos del rayo.

Típicamente más de 2000 tormentas están activas alrededor del globo terráqueo en un momento dado, produciendo aproximadamente 100 descargas/segundo, casi 30 millones de descargas/año lo que lo convierte en el principal regulador del balance calorífico del planeta, además de ser un gran fijador del nitrógeno en el suelo, necesario para la vida vegetal y un recuperador del ozono en el aire.

Los rayos son, sin embargo, el principal generador de disturbios electromagnéticos y tiene efectos muy negativos. Los principales son:

- Térmicos

Relacionados con el desprendimiento de calor, la temperatura máxima puede ser mayor a 30000° C. Se le asocian daños forestales, por fuego y de elementos eléctricos y electrónicos por sobrecalentamiento.

- Electrodinámicos

Debidos a los esfuerzos entre conductores paralelos próximos con la circulación de la corriente del rayo. Se le asocian daños de roturas de conductores eléctricos y telefónicos.

- Electromagnéticos

Asociados a la alta frecuencia del fenómeno que provoca radiaciones parásitas, inducción y acoplamiento de circuitos. Se le asocian daños debido a sobretensiones inducidas en circuitos eléctricos, electrónicos y de comunicaciones.

- Electroquímicos

En su trayectoria el rayo puede encontrar materiales metálicos en los que la reacción química que provoca es la corrosión; en especial en la zona de transición metal-tierra puede desgastar el metal o, si existe, la cubierta metálica anticorrosiva. Se le asocian daños en los sistemas de puesta a tierra.

- Fisiológicos

Anualmente el rayo es el responsable de un porcentaje importante de pérdidas de vidas humanas. En los sistemas eléctricos es frecuente alcanzar potenciales de varios centenares de kV en tomas de tierra de los equipos afectados.

6.4.1. El rayo como origen de incendio

Cuando un rayo impacta directamente sobre una estructura puede producir incendio y/o explosión debido a:

- el calor de arco del propio plasma,

- la corriente produce el calentamiento óhmico de los conductores
- la carga produce la erosión por arco (fusión de metal)
- las chispas causadas por las sobretensiones que producen los acoplamientos resistivo e inductivo y por la circulación de una parte de la corriente del rayo

Cuando un rayo impacta directamente sobre un servicio conectado a la estructura puede producirse incendio y/o explosión:

- iniciados por las chispas debido a las sobretensiones y la corriente del rayo transmitidas a través del servicio conectado.

Sólo las chispas que llevan la corriente del rayo (total o parcial) se consideran capaces de iniciar un incendio.

Los efectos del rayo pueden provocar:

- incendio en casas de vivienda construidas con materiales combustibles,
- incendio en edificaciones agrícolas,
- fallo de los sistemas de detección de incendio usados en teatros, hoteles, centros de enseñanza, tiendas por departamentos, áreas deportivas, bancos, compañías aseguradoras, compañías comerciales, hospitales, prisiones, etc., retardando la llegada de las medidas de extinción,
- consecuencias de incendio y explosión de las fábricas de fuegos artificiales y de municiones y sus alrededores
- incendio y malfuncionamiento de plantas químicas, bioquímicas, nucleares y refinerías, con consecuencias perjudiciales para el ambiente local y global,
- incendio y/o explosión de tuberías de gas debido a la perforación de las empaquetaduras de la pestaña no metálica.

Parámetros importantes del rayo desde el punto de vista de los sistemas de protección

- Nivel ceráunico (Nk).

Indicador establecido y ampliamente utilizado para expresar la cantidad de días tormenta al año de una región. Se da para cada país a través del Mapa de Niveles Isoceráunicos. Se obtiene a partir de las observaciones que se realizan en las estaciones meteorológicas, tomándose como día de tormenta, aquel en que el observador vea aunque sólo sea un



relámpago o escuche un trueno. De esta manera no se discrimina entre los rayos nube a nube, entre nubes y los rayos nube a tierra.

▪ Densidad de descargas a tierra (N_g)

Puede determinarse mediante: 1) Ecuaciones empíricas que establecen su relación con el nivel cerámico o 2) Mediciones directas con equipos contadores de rayos o localizadores.

▪ Amplitud de la primera descarga rápida (I_p)

La descarga primera descarga rápida es la etapa del fenómeno que tiene mayor aplicación en la ingeniería del diseño y protección de sistemas eléctricos y electrónicos, ya que presenta las mayores magnitudes de intensidad de corriente eléctrica entre el centro de carga de la nube y tierra.

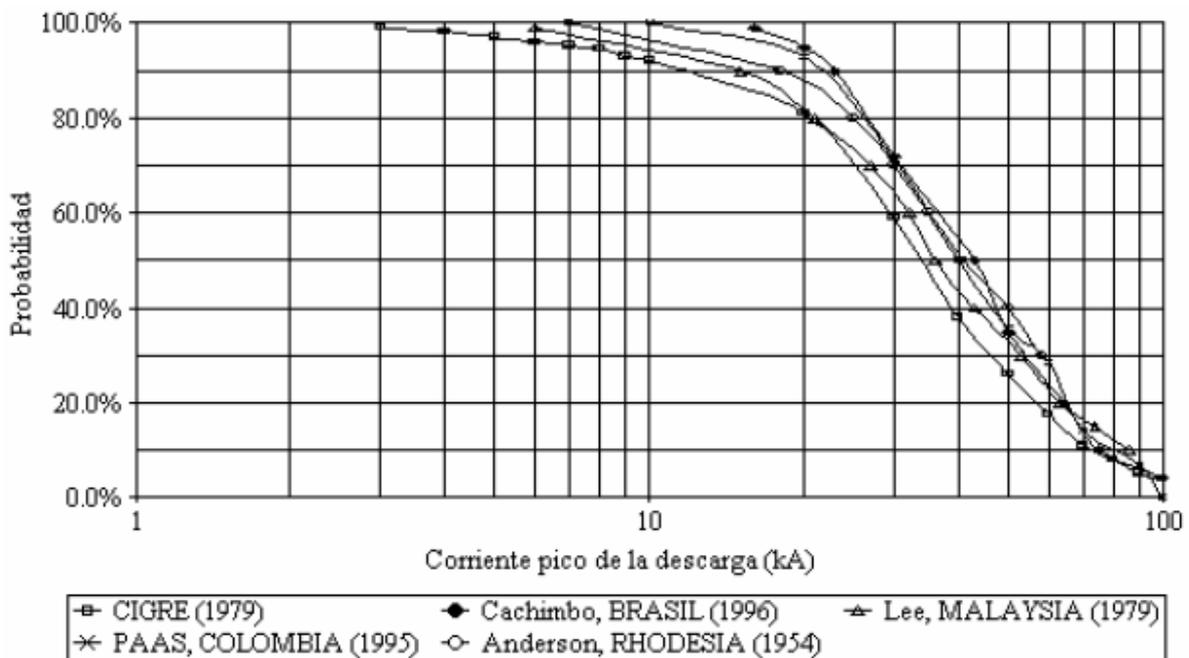


Figura 20 Comparación de las curvas de distribución probabilísticas de la corriente de retorno del rayo obtenidas con mediciones directas en torres en regiones tropicales: Malasia, Rhodesia (ahora Zimbabwe), Brasil y Colombia con la del CIGRE.

▪ Polaridad del rayo

Berger (1978) propuso cuatro tipos de descarga eléctrica atmosférica en términos de la dirección del movimiento de carga entre nube y tierra (ascendente o descendente) y en términos del signo de la carga del líder que inicia la descarga (positivo o negativo).

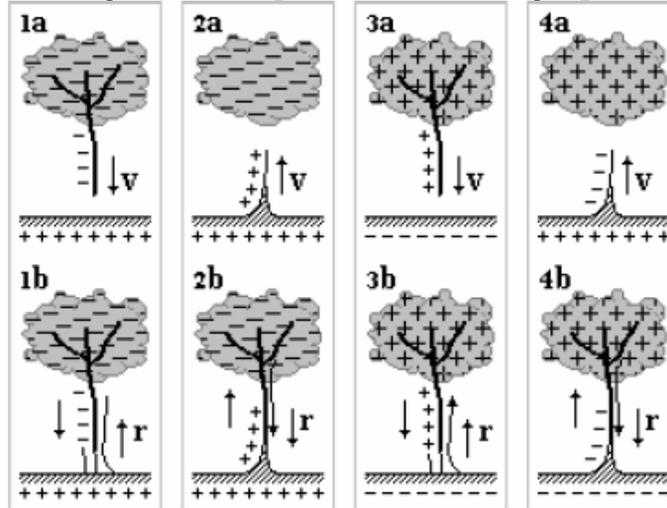


Figura 21 Polaridad de la descarga

▪ Multiplicidad del rayo

Es el número de descargas individuales que componen un rayo. Como promedio, en cada rayo ocurren 4 descargas con un tiempo de 3 ms separadas por un intervalo de 40 ms, para una duración total de 0,3 s.

▪ Formas de onda de las componentes del rayo

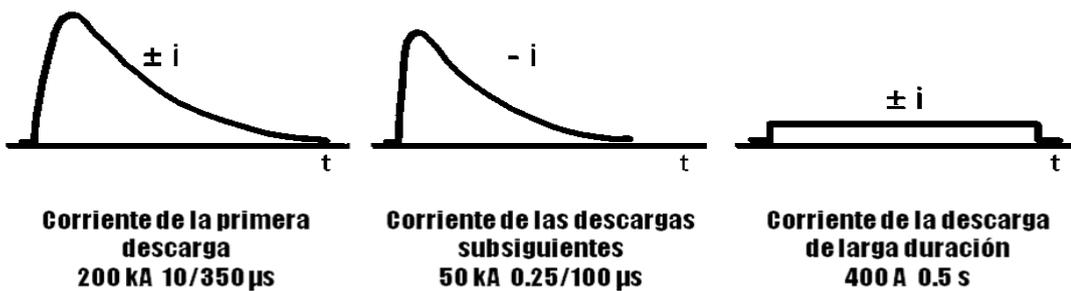


Figura 22 Formas de onda de las componentes del rayo

Para descargas de polaridad positiva:

- impulso positivo de corriente y, posiblemente,
- componente de directa positiva.

Para descargas de polaridad negativa:

- impulso negativo de corriente de la descarga principal y, posiblemente,
- impulsos negativos de corriente de las descargas consecutivas y, posiblemente,
- componente de directa negativa.

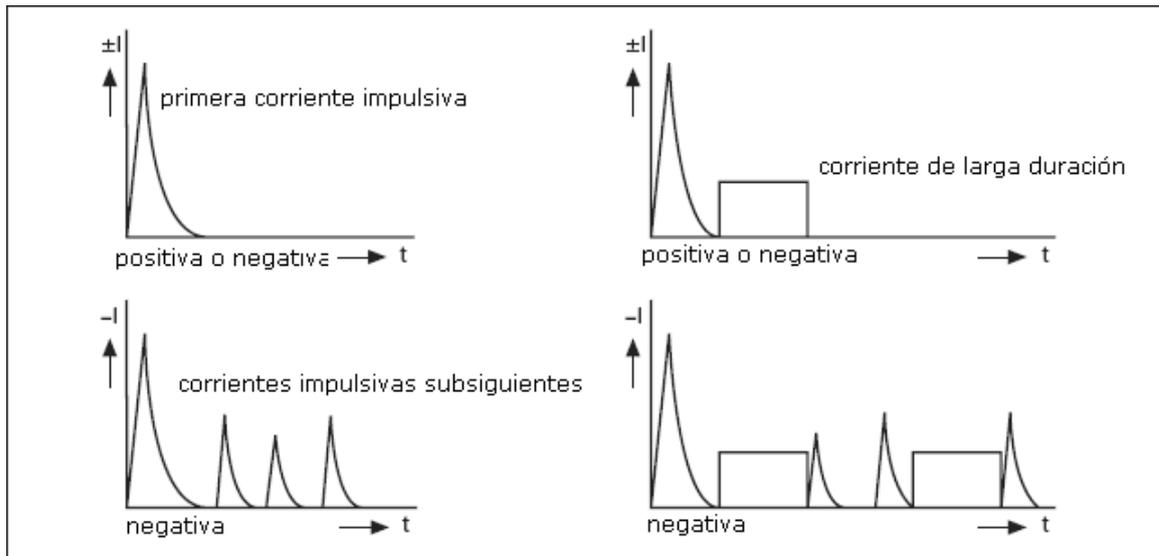


Figura 23 Posibles componentes de las descargas descendentes

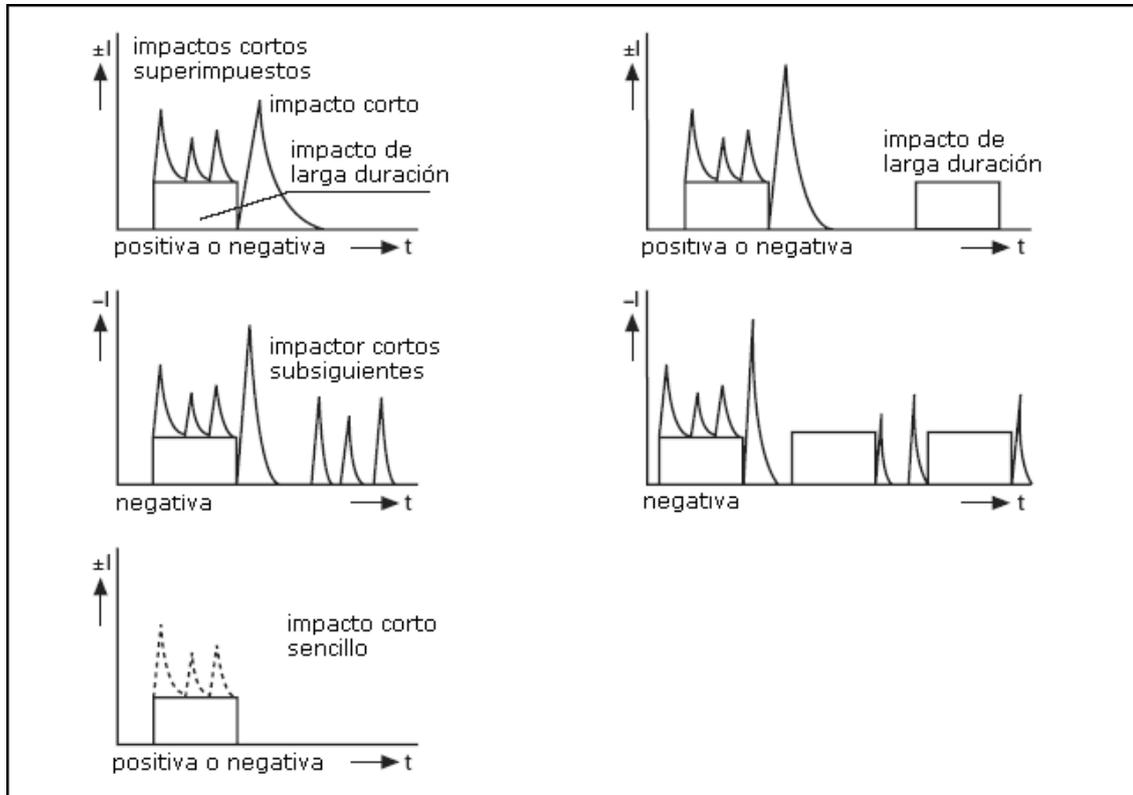


Figura 24 Posibles componentes de las descargas descendentes

Las magnitudes del rayo varían espacial y temporalmente. La variación espacial significa que sus parámetros varían global y localmente, influenciados por la delimitación de área y por influencias de los parámetros meteorológicos y geográficos. La variación temporal significa que los parámetros varían en diversas escalas en el tiempo, las cuales son diaria, mensual, anual y multianual.

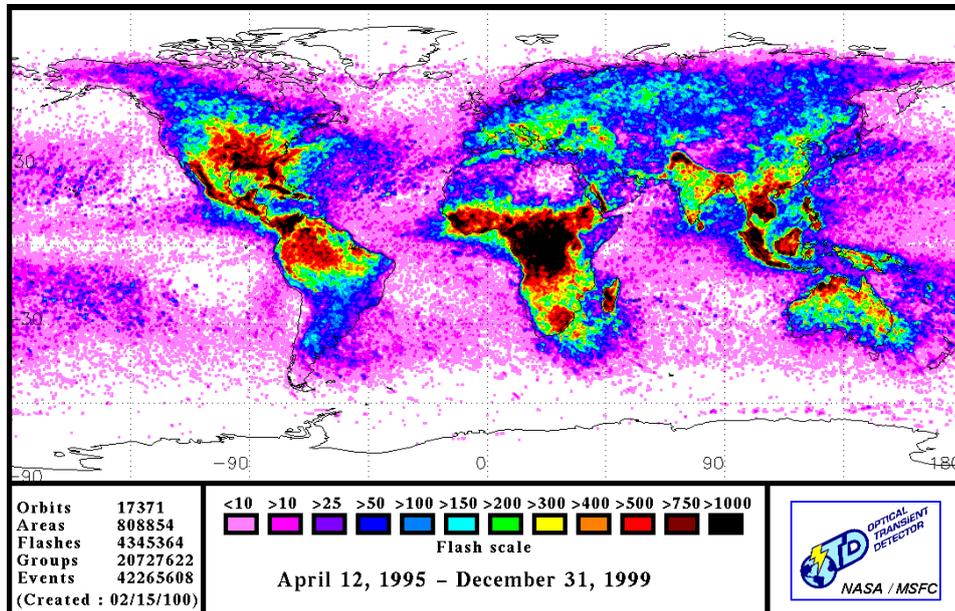


Figura 25 Mapa de distribución la actividad de rayos en el planeta

6.4.2. Análisis de riesgo de impacto de rayo.

El Análisis de Riesgo de impacto de rayo permite a los propietarios de edificios o a los arquitectos e ingenieros a determinar el riesgo de daño debido al rayo. Una vez que se ha determinado el riesgo, es mucho más fácil decidir sobre la necesidad de tomar medidas de protección. Esta metodología sólo considera los daños causados por un impacto directo sobre edificio o estructura y por las corrientes que circulan a través del sistema de protección.

Ejemplos de estructuras donde es obvia la necesidad de protección:

- Grandes concentraciones de personas
- Prioridad de la continuidad del servicio
- Alta frecuencia de descargas de rayo
- Gran altura y aislada
- Contenido materiales explosivos o inflamables
- Contenido de patrimonio cultural irremplazable

El riesgo de rayo **R** de una estructura es el producto de la frecuencia de impacto de rayos N_d por la consecuencia del rayo para la misma

Densidad de descargas de rayo (N_g): Cantidad de descargas a tierra anual por km^2 . Ver mapa

Frecuencia anual de impactos (N_d): Se determina mediante la siguiente expresión:

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_1 \cdot 10^{-6}$$

donde:

N_d = Frecuencia anual de impacto de rayos

N_g = Densidad de descargas de rayo anual en la región donde está ubicada la estructura

A_e = área equivalente de colección de la estructura en km^2

C_1 = coeficiente ambiental

Área Equivalente de Colección (A_e): Es el área de terreno que tiene la misma probabilidad de descarga directa de rayo que la estructura. Esta es un área incrementada de la estructura que incluye el efecto de la altura y su localización.

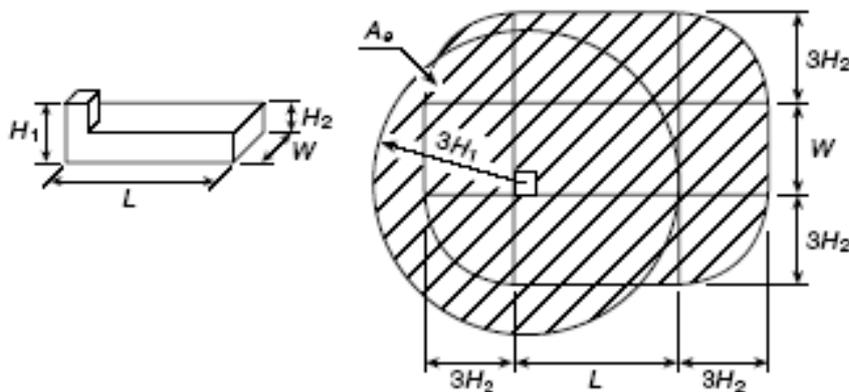


Figura 26 Ejemplo de cálculo de área de colección equivalente

Coeficiente ambiental (C_1): Toma en cuenta la topografía del lugar de la estructura y cualquier objeto ubicado dentro de una distancia $3 \times H$ de la estructura que puede afectar el área de colección.

Ubicación relativa de la estructura	C_1
Estructura rodeada de otras o de árboles de similar altura o más altos en una distancia de $3H$	0,25
Estructura rodeada de otras más bajas en una distancia de $3H$	0,5
Estructura aislada y no hay otras en una distancia de $3H$	1,0
Estructura aislada sobre una colina	2,0

Tabla 1 Selección del coeficiente C_1

Frecuencia tolerable de rayos (N_c): Es una medida del riesgo de daño a la estructura incluyendo factores que afectan los riesgos para la estructura, el ambiente y pérdidas económicas. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$N_c = 1,5 \cdot 10^{-3} / C$$

donde: $C = C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5$

Coeficiente de Materiales de la Estructura C_2			
Estructura	Techo		
	Metálico	No metálico	Inflamable
Metálica	0.5	1.0	2.0
No metálica	1.0	1.0	2.5
Inflamable	2.0	2.5	3.0

Tabla 2 Selección del coeficiente C_2

Coeficiente de Contenido de la Estructura	C_3
Valor bajo y no inflamable	0,5
Valor normal y no inflamable	1,0
Valor alto, inflamabilidad moderada	2,0
Valor excepcional, inflamable, computación o electrónica	3,0

Valor excepcional, piezas culturales irremplazables	4,0
---	-----

Tabla 3 Selección del coeficiente C_3

Coeficiente de Ocupación de la Estructura	C_4
Desocupada	0,5
Normalmente ocupada	1,0
Difícil evacuación o riesgo de pánico	3,0

Tabla 4 Selección del coeficiente C_4

Coeficiente de Consecuencias de Rayo	C_5
No se requiere la continuidad de los servicios de la instalación, sin impacto ambiental	1,0
Se requiere la continuidad de los servicios de la instalación, sin impacto ambiental	5,0
Consecuencias para el ambiente	10,0

Tabla 5 Selección del coeficiente C_4

Selección del Nivel de Protección.

La Frecuencia tolerable de rayos (N_c) se compara con la Frecuencia esperada de rayos (N_d)

El resultado de esta comparación permite decidir si se necesita un sistema de protección contra rayos:

Si $N_d \leq N_c$: es opcional la instalación de un LPS.

Si $N_d > N_c$: tiene que instalarse un LPS.

Cuando se instala un LPS, deben considerarse también las siguientes medidas de protección adicionales:

1. Medidas que limiten las tensiones de paso y de contacto

2. Medidas que restrinjan la propagación del fuego
3. Medidas que limiten las tensiones inducidas
4. Medidas para reducir los efectos de las sobretensiones inducidas de rayo en los equipos electrónicos sensibles.

6.4.3. Características generales de los Sistemas de Protección Contra Rayos

Los sistemas de protección contra rayos son usados para proteger contra daños físicos (del incendio o la destrucción mecánica) los edificios y contra lesiones a los seres vivos dentro del mismo, debido a las descargas de rayo. Un sistema de protección contra rayos comprende una protección contra rayo **externa** y otra **interna**.

Las funciones de la protección contra rayo **externa** son:

- Dirigir los impactos directos de rayos al sistema de captura.
- Conducir de forma segura de la corriente del rayo a tierra por medio de un sistema de conductores de bajada.
- Distribuir la corriente del rayo en el terreno mediante un sistema de puesta a tierra.

La función de la protección contra rayo **interna** es:

- Evitar el salto de chispas peligrosas que pueden producirse entre el sistema externo protección contra rayo o los elementos metálicos de la estructura y las instalaciones metálicas interiores.

6.4.4. Sistema externo de protección contra rayos (SPCR_{EXT})

La protección externa es el conjunto de elementos situados en o sobre el objeto a proteger y que sirve para interceptar el rayo, conducir su corriente y disiparla en la tierra. Consta principalmente de tres partes:

- **Instalación captadora:** El dispositivo de intercepción agrupa a todos los elementos o partes metálicas sobre los que el rayo debe o puede impactar. Estos pueden estar emplazados por encima o al lado de la edificación que debe ser protegida y sirven como blanco para el impacto de la descarga.

- **Instalación de bajantes:** Son los cables que se conectan desde el dispositivo de intercepción hasta la puesta a tierra. El bajante, por tanto, es la parte que se encarga de conducir a tierra la corriente del rayo.
- **Instalación de puesta a tierra:** Está formada por uno o un conjunto de electrodos u otros elementos metálicos enterrados (barras, tuberías, estructuras de la instalación), que tienen como función disipar al terreno las corrientes de impulso del rayo.

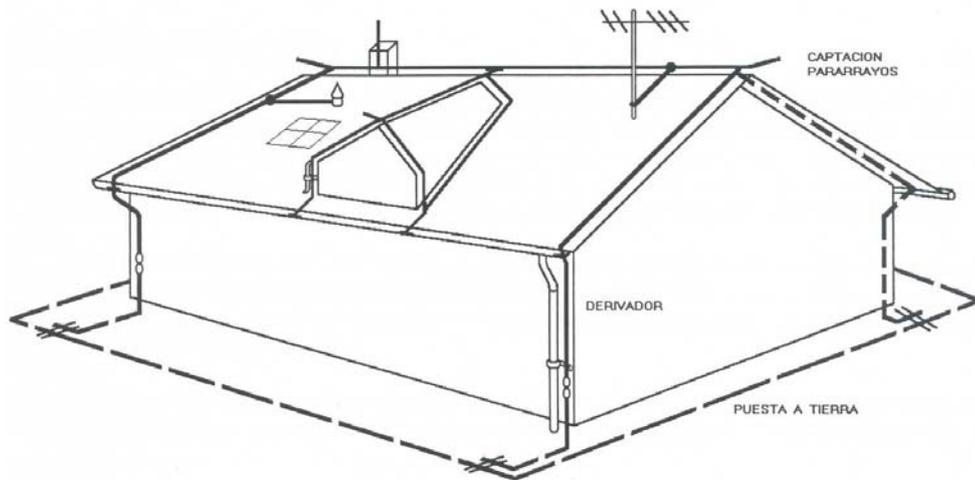


Figura 27 Sistema externo de protección contra rayo.

El SPCR_{EXT} puede ser:

- **NO AISLADO:** Generalmente está unido a la estructura a proteger.
- **AISLADO:** Se conecta únicamente a los elementos metálicos estructurales y a la red de unión equipotencial a nivel del terreno.

El SPCR_{EXT} Aislado se usa cuando los efectos térmicos y de explosión en el punto de impacto o en los conductores de la corriente del rayo, pueden causar daño a la estructura y su contenido.

Ejemplos de estructuras donde se aplica:

- Con cubierta combustible.
- Con paredes combustibles.
- En áreas con riesgo de incendio o explosión.



- Donde se prevean cambios en la estructura, el contenido o el uso, que impliquen modificaciones al LPS.

Sistema de captura

Los captadores son los elementos metálicos, cuyo principio de acción está basado en la emisión natural que se presenta en dichos elementos ante la presencia de un campo eléctrico de elevada magnitud, sin que medie ningún otro dispositivo. Comúnmente reciben el nombre de sistemas Franklin.

Los dispositivos de captura del rayo se clasifican como:

- Punta Franklin.
- Malla o jaula Faraday.
- Hilo tendido.

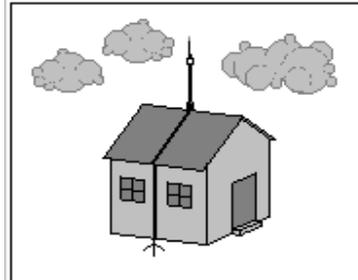
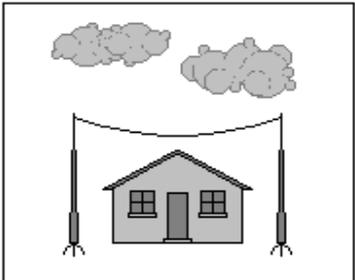
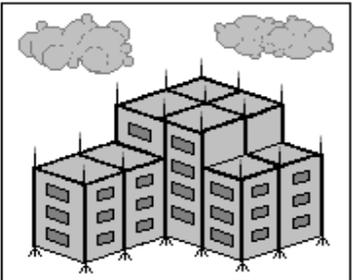
Punta Franklin	Tendido	Jaula de Faraday
<p>Su misión es provocar la excitación atmosférica por encima de cualquier otro punto de la estructura a proteger, para aumentar la probabilidad de que la descarga incida en un punto específico, y derivar a tierra la corriente del rayo.</p>	<p>Protección formada por uno o múltiples conductores aéreos situados sobre la estructura a proteger. Los conductores se deberán unir a tierra mediante bajantes en cada uno de sus extremos. El área protegida vendrá dada por el conjunto de conductores aéreos.</p>	<p>El sistema consiste en la recepción del rayo a través de una malla que apantalla el objeto a proteger, que en ocasiones puede utilizarse con puntas de intercepción, la cual deriva a tierra mediante una red de bajantes conductores.</p>
		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Una varilla captadora, junto consumástil. ▪ Uno o dos bajantes. ▪ Un desconector por bajante para la comprobación de la resistencia de puesta a tierra en caso de mantenimiento. ▪ Un elemento protector contra golpes en los dos últimos metros del bajante conductor. ▪ Una toma de tierra por bajante. ▪ Unión equipotencial de las tomas de tierra y circuito general de tierras. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Uno o varios conductores aéreos. ▪ Un bajante en cada extremo de los conductores. ▪ Una toma de tierra por bajante. ▪ Unión equipotencial de las tomas de tierra y circuito general de tierras. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reticulado o malla sin o con puntas de intercepción. ▪ Un bajante conductor por punta de intercepción si existe. ▪ Una toma de tierra por bajante. ▪ Unión equipotencial de las tomas de tierra y circuito general de tierras.

Figura 28 Configuraciones básicas de captadores.

Estructuras ordinarias

Definición:

Cualquier estructura usada para propósitos ordinarios tales como comercial, industrial, agrícola, institucional o residencial.

Forma de protección:



Las estructuras ordinarias se protegerán de la siguiente manera:

- (1) Las estructuras ordinarias con altura ≤ 23 m, con materiales Clase I.
- (2) Las estructuras ordinarias con altura ≥ 23 m, con materiales Clase II.
- (3) Si parte de una estructura tiene altura ≥ 23 m (ejemplo: una torre) y la parte restante no, los requerimientos para captadores y conductores Clase II se aplicarán sólo a esa parte que excede los 23 m de altura. Los conductores Clase II de la parte superior se prolongarán hasta el terreno y se interconectarán con el resto del sistema.

Materiales:

Los sistemas de protección se harán con materiales que sean resistentes a la corrosión o protegidos contra la corrosión. No se usarán las combinaciones de materiales que forman pares electrolíticos de una naturaleza tal que en presencia de humedad se acelera la corrosión. Se usarán uno o más de los siguientes materiales:

- a) *Cobre*. El cobre será del grado requerido para trabajo eléctrico comercial y del 95 % de conductividad cuando sea templado.
- b) *Aleaciones de cobre*. La aleación de cobre será tan resistente a la corrosión como el cobre.
- c) *Aluminio*. El aluminio no será usado donde es haya contacto con el terreno o donde sea posible su rápido deterioro. Los conductores serán de aluminio de grado eléctrico.

Tipo de conductor	Parámetro	Cobre		Aluminio	
		Inglesa	Métrica	Inglesa	Métrica
Captador, sólido	Diámetro	3/8in.	9.5 mm	1/2in.	12.7 mm
Captador, tubular	Diámetro	5/8 in.	15.9 mm	5/8in.	15.9 mm
	Espesor de la pared	0.033 in.	0.8 mm	0.064 in.	1.6 mm
Conductor principal, cable	Tamaño de cada hilo	17 AWG		14 AWG	
	Peso por longitud	187 lb/1000 ft	278 g/m	95 lb/1000 ft	141 g/m
	Área sección transversal	57,400 CM	29 mm ²	98,600 CM	50 mm ²
Conductor principal, cinta	Espesor	0.051 in.	1.30 mm	0.064 in.	1.63 mm
	Ancho	1 in.	25.4 mm	1 in.	25.4 mm
Conductor de unión, cable (sólido o trenzado)	Tamaño de cada hilo	17 AWG		14 AWG	
	Área sección transversal	26,240 CM		41,100 CM	
Conductor de unión, cinta sólida	Espesor	0.051 in.	1.30 mm	0.064 in.	1.63 mm
	Ancho	1/2in.	12.7 mm	1/2in.	12.7 mm

Tabla 6 Requerimientos mínimos de los materiales Clase I

Tipo de conductor	Parámetro	Cobre		Aluminio	
		Inglesa	Métrica	Inglesa	Métrica
Captador, sólido	Diámetro	1/2in.	12.7 mm	5/8in.	15.9 mm
Conductor principal, cable	Tamaño de cada hilo	15 AWG		13 AWG	
	Peso por longitud	375 lb/1000 ft	558 g/m	190 lb/1000 ft	283 g/m
	Área sección transversal	115,000 CM	58 mm ²	192,000 CM	97 mm ²
Conductor de unión, cable (sólido o trenzado)	Tamaño de cada hilo	17 AWG		14 AWG	
	Área sección transversal	26,240 CM		41,100 CM	
Conductor de unión, cinta sólida	Espesor	0.051 in.	1.30 mm	0.064 in.	1.63 mm
	Ancho	1/2in.	12.7 mm	1/2in.	12.7 mm

Tabla 7 Requerimientos mínimos de los materiales Clase II

Métodos de posicionamiento de los captadores.

- del ángulo de protección
- de la esfera rodante

Posicionamiento según el método del ángulo de protección

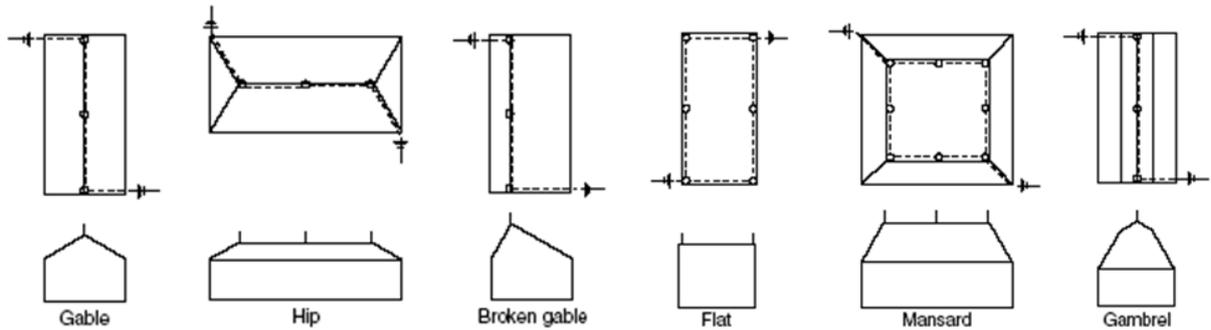


Figura 29 Protección según el tipo de techo

La zona de protección formará un cono cuyo vértice está localizado en el punto más alto del captador, con paredes que forman aproximadamente un ángulo de 45° o 63° con la vertical.

Para estructuras que no excedan los 15 m de altura:

Las estructuras que no exceden los 7,6 m por encima del terreno se considerarán que protegen a las partes inferiores de la estructura localizadas en una zona de protección de 1 a 2.

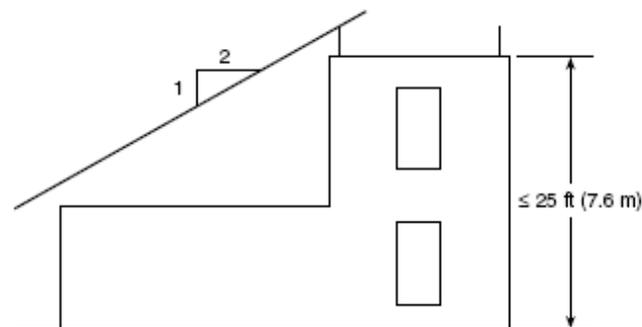


Figura 30 Protección de techo inferior en edificio de techo plano con altura $\leq 7,6$ m.



Las estructuras que no exceden los 15 m por encima del terreno se considerarán que protegen a las partes inferiores de la estructura localizadas en una zona de protección de 1 a 1.

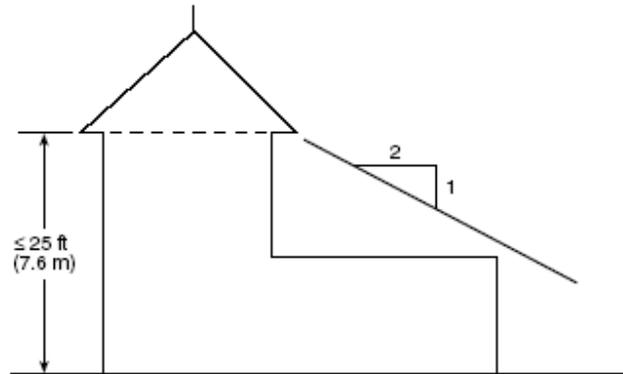


Figura 31 Protección de techo inferior en edificio de techo inclinado con altura $\leq 7,6$ m.

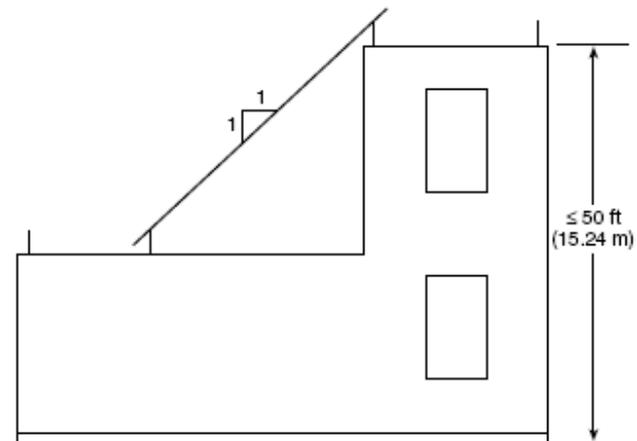


Figura 32 Protección de techo inferior en edificio de techo plano con altura $\leq 15,24$ m.

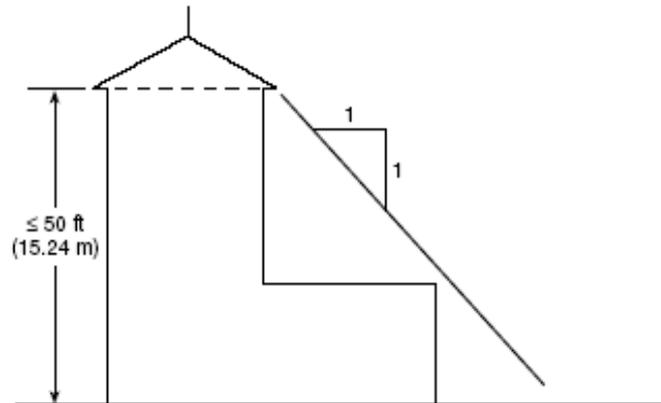
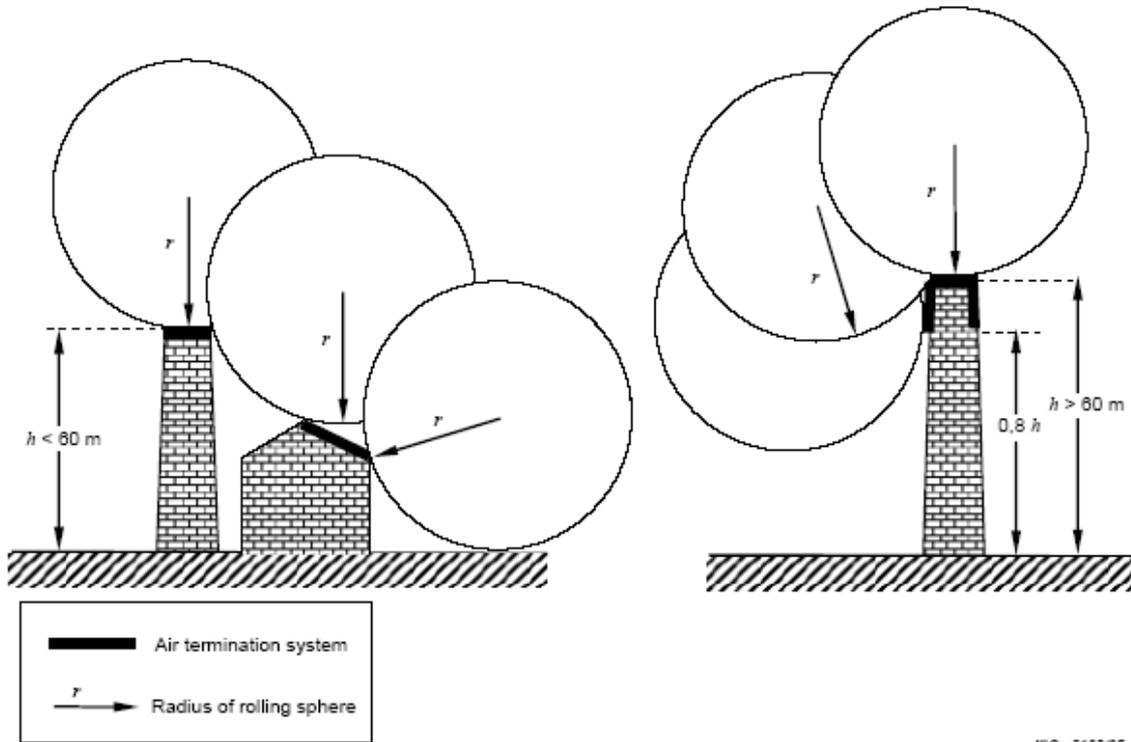


Figura 33 Protección de techo inferior en edificio de techo inclinado con altura $\leq 15,24$ m.

Posicionamiento según el método de la esfera rodante.

Consiste en hacer rodar una esfera ficticia, de radio 150 ft (46 m), alrededor y sobre la estructura a proteger en todas las direcciones posibles, considerándose como zona de protección el espacio no ocupado por dicha esfera y la superficie exterior de dicha estructura. Una zona de protección también estará formada por todo el espacio en el plano vertical entre los dos puntos de contacto de la esfera y bajo ésta, cuando es tangente con el terreno y descansa contra un captador o cuando descansa en dos o más captadores. De esta manera, la esfera sólo toca el sistema de captura.



MEC 2103/05

Figura 34 Aplicación del método de la esfera rodante

Sobre estructuras más altas que los radios de la esfera rodante r , pueden ocurrir descargas en los laterales de la estructura. Cada punto lateral de la estructura tocado por la esfera rodante es un punto posible de impacto. Sin embargo, la probabilidad de descargas en los laterales generalmente es despreciable para estructuras más bajas que 60 m.

Para estructuras más altas, la mayoría de las descargas golpearán la cubierta, los bordes horizontales y las esquinas de la estructura. Sólo un pequeño porcentaje de las descargas serán en los lados de la estructura.

Además, los datos de observación muestran que la probabilidad de descargas en los laterales decrece rápidamente con la altura del punto de impacto en las estructuras altas medida desde el terreno. Por tanto, debe considerarse la instalación de captadores laterales en la parte superior de las estructuras altas (típicamente en el 20 % superior de la

altura de la estructura). En este caso, para el posicionamiento del sistema de captura de la parte superior de la estructura solo será aplicable el método de la esfera rodante.

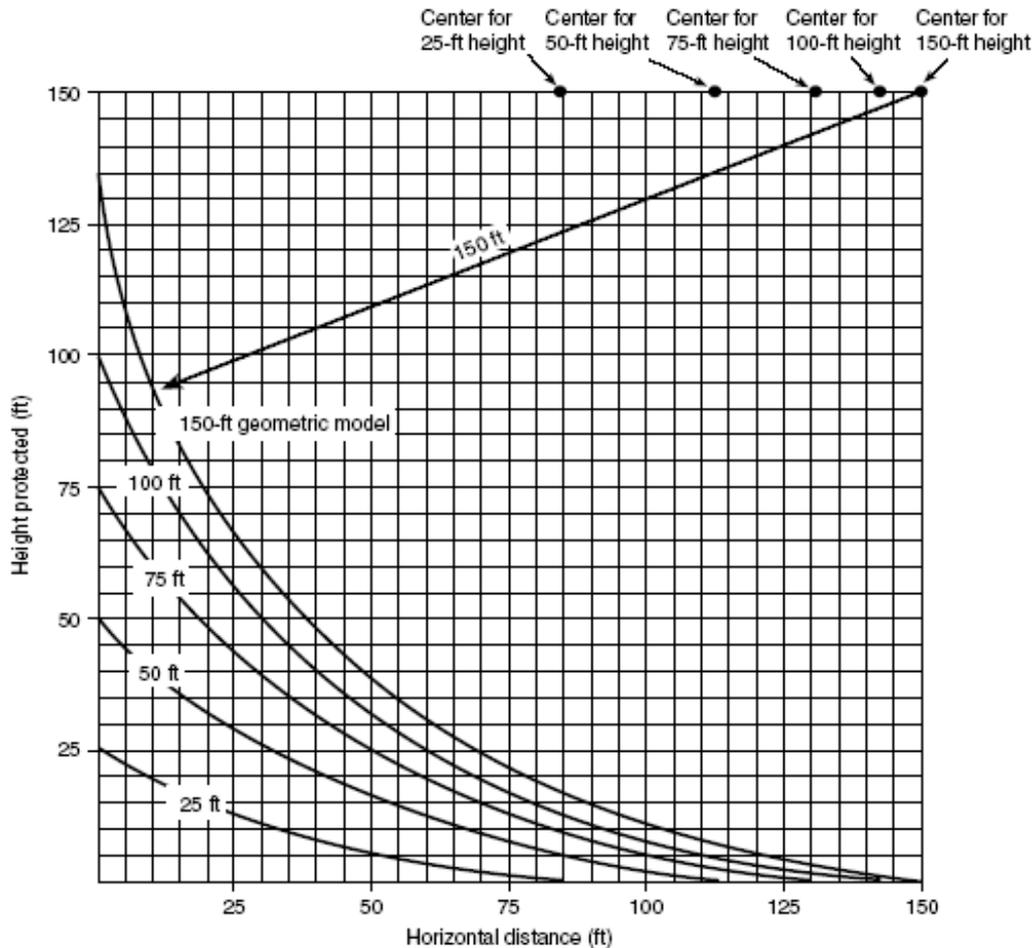


Figura 35 Método de ángulo de protección

Sistema de bajantes.

Los conductores de bajada serán separados tanto como sea posible. Su ubicación dependerá de las siguientes consideraciones:

- (1) Ubicación de los captadores
- (2) Recorrido más directo de los conductores
- (3) Condiciones de tierra
- (4) Seguridad contra el desplazamiento

- (5) Localización de grandes cuerpos metálicos
- (6) Localización de sistemas de tuberías metálicas soterrados

De forma general debe cumplir con los siguientes aspectos:

- Se proporcionarán al menos dos conductores de bajada para cualquier tipo de estructura, incluyendo las torres. La cantidad total de conductores de bajada en las estructuras será tal que la distancia promedio entre todos los conductores no exceda los 30 m. Se repartirán de forma uniforme a lo largo del perímetro y se situarán, en la medida de lo posible, cerca de los diferentes ángulos de la estructura.
- Deben seguir el trayecto más corto y recto posible. Están prohibidos los cambios bruscos de dirección. Los radios de curvatura no serán inferiores a 20,3 cm (no inferiores a 90°). Se ha de evitar el remonte de cornisas o elevaciones. Se preverán lugares de paso lo más directos posible para los conductores. Se admite un remonte máximo de 40 cm. para vencer una elevación con una pendiente menor o igual a 45°.
- Su trazado debe ser elegido de forma que evite la proximidad de conducciones eléctricas.

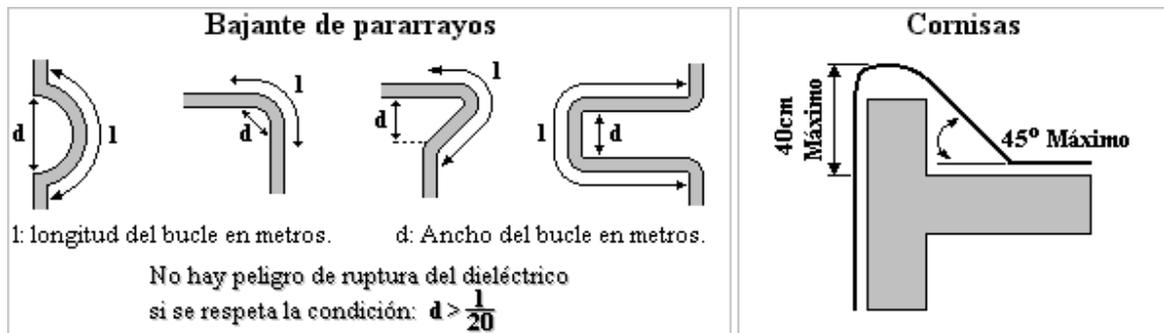


Figura 36 Trazado del bajante en acodamientos y cornisas

Fijaciones.

Las fijaciones de los conductores de bajada se podrán cada 0,5 m. Estas fijaciones deben ser apropiadas para los soportes y realizadas de forma que no afecten a la impermeabilidad de la cubierta. Deben permitir una posible dilatación de los conductores.

Unión de conductores.

La unión de diferentes conductores entre sí se realiza a presión con la ayuda de piezas de unión de la misma naturaleza, empalme o soldadura. Se debe evitar la perforación de los cables.

Funda de protección.

Los conductores de bajada deben estar protegidos contra eventuales choques mecánicos mediante un tubo de protección hasta una altura de 2 m a partir del suelo.

Unión de comprobación.

Cada conductor de bajada estará provisto de un dispositivo que permita desconectarlo de la toma de tierra a fin de efectuar la medición de resistencia a tierra así como verificar el estado de los bajantes. Se intercalan en los bajantes a 2 m por encima del suelo. Para las instalaciones sobre paredes metálicas, o que no estén provistas de un bajante específico, las uniones se intercalaran entre cada toma de tierra y el elemento metálico del edificio al que estén unidas.

Sistema de puesta tierra.

En general, comprende la unión metálica directa, sin fusibles ni protección alguna, mediante un conductor de sección suficiente entre determinados elementos de una instalación o equipo y un electrodo, grupo de electrodos, o mallas enterradas en el suelo, con el objetivo de conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificios, equipos y en la superficie de las instalaciones no existan diferencias de potencial peligrosas y además, que permita el paso de las corrientes de falla o de las descargas atmosféricas.

Funciones de los sistemas de puesta a tierra.

El sistema puesta a tierra debe cumplir con las siguientes funciones:

- La protección contra procesos transitorios debido tanto a operaciones o fallas en el sistema como a los rayos.
- Estabilizar los potenciales en los circuitos respecto a tierra y proporcionar la operación de las protecciones contra fallas a tierra.
- Asegurar que las estructuras metálicas que no llevan corriente estén siempre al potencial de tierra, aún en el caso de falla del aislamiento.

- Reducir los peligrosos gradientes de potencial en la superficie de las subestaciones y demás instalaciones durante las máximas condiciones de falla.
- Establecimiento de un potencial de referencia para la operación eficiente de la electrónica.

Requerimientos de la red de puesta a tierra.

- Cada conductor de bajada terminará en un electrodo de tierra dedicado al sistema de protección contra rayo.
- Las tuberías metálicas enterradas, los electrodos de tierra de los sistemas eléctricos y de telecomunicaciones no se usarán en lugar de los electrodos de tierra rayo; esta disposición no prohíbe la interconexión requerida entre estos.
- Los conductores de bajada se unirán de forma permanente a la red de electrodos de tierra mediante abrazaderas, pernos, soldadura o conectores de alta compresión listados para este fin y adecuados para ser directamente enterrados.
- Los electrodos de tierra pueden ser de acero recubierto con cobre, cobre sólido o acero inoxidable.
- Los electrodos de tierra se instalan por debajo de la a de congelación cuando sea posible (excluyendo la capa superior superficial del suelo).

TIPOS DE ELECTRODOS DE TIERRA:

Electrodos de tierra verticales.

Los electrodos verticales de tierra no serán inferiores a 12,7 mm de diámetro y 2,4 m de largo y estarán libres de pintura o de otros cubrimientos no conductores. Se clavarán verticalmente no menos de 3 m en el terreno y éste se compactará y se apretará contra la longitud del conductor y el electrodo de tierra.

Electrodos verticales múltiples.

Donde se utilicen múltiples electrodos verticales, la separación entre cualesquiera dos electrodos adyacentes será al menos la suma de sus profundidades clavadas donde sea posible.

Electrodos embebidos en hormigón.

Se usarán solo en las nuevas construcciones. Se ubicarán cerca de la base del soporte de hormigón o en la cimentación que está en contacto directo con el terreno y estará recubierto por no menos de 50 mm de hormigón.

Tendrán una de las siguientes formas:

- (1) No menos de 6 m de conductor desnudo de cobre de de diámetro del conductor principal.
- (2) Al menos 6 m de uno o más de las barras o varillas de acero de refuerzo no menores de 12,7 mm de diámetro que haya sido unida efectivamente mediante soldadura o solapamiento de una longitud igual a 20 veces el diámetro y amarre con alambre.

Electrodo de tierra de anillo.

Encerrará la estructura y estará enterrado a una profundidad no menor que 0,46 m o embebido en el hormigón de cimentación. Consistirá en un conductor de cobre desnudo de diámetro del conductor principal no menor que 6 m continuos.

Radiales.

Consiste en uno o varios conductores de diámetro del conductor principal, cada uno colocado en una trinchera que se extiende hacia el exterior a partir de la ubicación del conductor de bajada. Cada electrodo radial tendrá una longitud mayor que 3,6 m y estará a una profundidad de enterramiento mayor que 0,46 m y diverge a un ángulo inferior a 90 °.

Electrodo de placa.

Tendrá un espesor mínimo de 0,8 mm y un área de superficie mínima de 0,18 m². Se enterrará a una profundidad no menor que 0,46 m por debajo del nivel del terreno.

Selección del electrodo de tierra.

Las limitaciones de espacio del sitio y las condiciones del suelo determinarán la selección del tipo o combinaciones de tipos de electrodos de tierra a usar.

Resistencia a tierra

Se exige que la red de puesta a tierra para protección contra rayo tenga un valor de resistencia menor que 10 Ω.

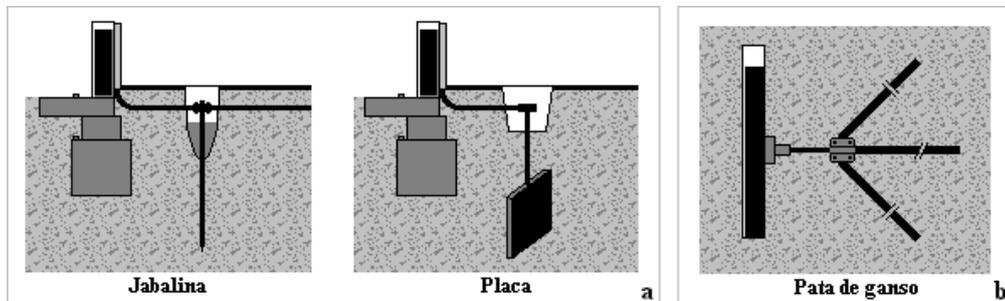


Figura 37 Ejemplo de electrodos de tierra verticales (a) y horizontales (b).

Los rayos tienen gran potencial y alta corriente con componentes espectrales de alta frecuencia (hasta 3 MHz), por ello son causa de interferencias en los sistemas electrónicos. Son de alta frecuencia por la elevada razón de cambio de la corriente en el tiempo (dI/dt). Por ello, para conducir en el terreno las descargas de rayos hay que tener presente los conceptos básicos de las técnicas para ondas de alta frecuencia.

La inductancia de los conductores de cobre usados para los electrodos de tierra es de aproximadamente de 1,64 $\mu\text{H}/\text{m}$. A la frecuencia equivalente de los rayos, la impedancia debida a la inductancia es muchas veces mayor que la debida a la resistencia del conductor. Por lo que los conductores con longitudes mayores que 10 m tienen una impedancia infinita en términos prácticos, lo que impide que conduzcan efectivamente la corriente. Además, los dobleces de los conductores incrementan la reactancia inductiva. De ahí, que se recomiende que los conductores de tierra tengan curvas suaves con radio de al menos 20 cm y en lugar de utilizar un único conductor de gran longitud se usen varios conductores más cortos interconectados. Cuando a los electrodos se le aplica una onda electromagnética, ésta se propaga a diferentes velocidades, cambiando su amplitud (atenuación) y forma (distorsión). No toda la dimensión del electrodo presenta el mismo comportamiento, por lo que existen dimensiones efectivas para cada frecuencia por encima de las cuales no se obtiene una reducción de su impedancia.

Los rayos, se comporta como una onda de choque, por tanto, su comportamiento está determinado por la impedancia característica de los electrodos, los coeficientes de propagación de la onda, los acoplamientos electromagnéticos, la distribución no lineal de la tensión y la corriente y la posible ionización del terreno circundante. Es importante que

la impedancia a tierra sea baja para la descarga, ya que todas las partes del sistema conectadas a tierra, variarán su potencial con respecto a la misma en el tiempo que dura la descarga. Por ejemplo: una malla constituida por 36 retículas de 30 x 30 m de cable de cobre de 0,5 cm de diámetro tiene una inductancia de 40 μH , lo que dará una impedancia de 25 Ω al inyectarle una onda impulsiva con un tiempo de subida de 1,2 μs .

6.4.5. Sistema interno de protección contra rayo (SPCR_{INT}).

Función

Evitar la ocurrencia de chispas peligrosas dentro de la estructura debido a la circulación de la corriente del rayo por el sistema de protección externo o las partes conductoras de la estructura y que pueden ocurrir entre el sistema externo y otros componentes tales como:

- Las instalaciones metálicas.
- Los sistemas internos.
- Las partes y líneas conductoras externas conectadas a la estructura.

Medios

- Aislamiento eléctrico entre las partes.
- Unión equipotencial.

Aislamiento eléctrico entre las partes

El aislamiento eléctrico entre los captadores y conductores de bajada y las partes metálicas estructurales, las instalaciones metálicas y los sistemas internos se logra garantizando una distancia d entre dichas partes mayor que la distancia de separación s , siendo ésta la mínima distancia que deberá existir para evitar chispas peligrosas.

En caso de líneas o partes conductoras externas conectadas a la estructura, siempre es necesario asegurar la unión equipotencial en sus puntos de entrada a la estructura, mediante conexión directa o con vía de chispa de aislamiento.

En las estructuras metálicas o con armazón de hormigón reforzado interconectado y eléctricamente continuo, no se requiere el cumplimiento de dicha distancia de separación.

Unión equipotencial

Unión con:

- Instalaciones metálicas
- Partes conductoras externas
- Sistemas internos
- Líneas conectadas a la estructura

Medios de interconexión:

- **Conductores de unión:** donde la continuidad eléctrica no se garantice mediante las uniones naturales.
- **Vías de chispa de aislamiento:** donde no sean factibles las conexiones directas con conductores de unión.

Cuando se requiere unión equipotencial, pero no un sistema externo de protección contra rayo, la red de puesta a tierra de la instalación eléctrica de baja tensión puede usarse para este fin.

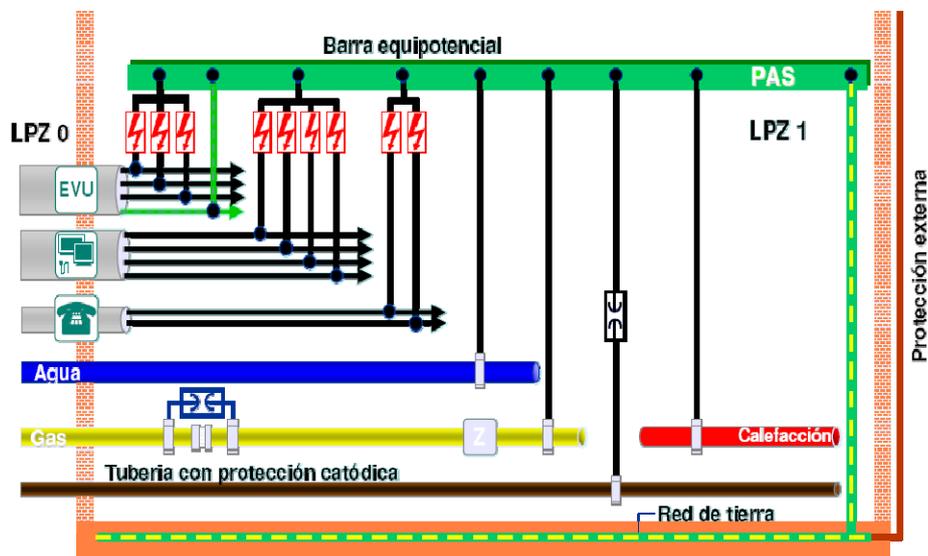


Figura 38 Medios de Unión equipotencial

6.4.6. Protección contra rayos en estructuras con riesgo de incendio y/o explosión.

Tanques aéreos a presión atmosférica que contienen vapores inflamables o líquidos que emiten vapores inflamables.

1. Tanques de techo fijo. Los tanques metálicos con o sin miembros de soporte que se utilizan para el almacenamiento de gases inflamables o de líquidos que emiten vapores inflamables a presión atmosférica se consideran autoprotegidos contra rayos y no requieren de protección adicional, si se satisfacen los siguientes requerimientos:

- Todas las uniones entre partes metálicas son remachadas, atornilladas o soldadas.
- Todas las tuberías que entran al tanque están metálicamente conectadas al mismo en el punto de entrada.
- No habrá espacios de chispa. Todas las aberturas para gas o vapor están cerradas o provistas de protección contra llama en las localizaciones donde la reserva almacenada puede producir una mezcla inflamable de aire-vapor bajo las condiciones de almacenamiento.
- El cuerpo y techo del tanque tendrán un espesor no menor que 5 mm para el acero o 7 mm para el aluminio.
- El techo está soldado, atornillado o remachado al cuerpo.

2. Tanques de techo flotante.

Han ocurrido incendios por impacto de rayo en estos tipos de tanques:

- En los bordes: cuando su contenido es volátil y los techos se encuentran en una posición alta.
- En el sello: cuando existen pequeños puntos de escape del mismo y con espacios de vapor por debajo de las membranas flexibles.
- Por encima del sello: al inflamarse los vapores contenidos dentro del espacio abierto cuando la posición del techo era baja.

La ignición también puede provenir de una descarga súbita de una nube a otra o de nube a tierra debido a la carga inducida en el techo flotante.

Para minimizar el riesgo de incendio, tienen que cumplirse los siguientes requerimientos:

- El techo tiene que estar efectivamente unido al cuerpo principal del tanque.
- Se colocarán derivadores formados por cintas anchas de acero inoxidable flexible de 0,4 mm × 51 mm o con la capacidad portadora de corriente y resistencia a la

corrosión equivalentes. Se instalarán de manera tal que hagan contacto directo entre el techo flotante y el cuerpo del tanque en todas las posiciones de operación del techo. Se espaciarán a intervalos no mayores que 3 m en la circunferencia del tanque.

- El techo estará eléctricamente unido a los recubrimientos del sello a través de la trayectoria eléctrica más directa a intervalos no mayores que 3 m.

3. Tanques metálicos con techos no metálicos. Los tanques metálicos con techos de madera o de otros materiales no metálicos no se consideran autoprotegidos, aún si el techo sea estanco y esté recubierto con un fino metal y todas las aberturas están provistas con protección contra llama. Dichos tanques se proveerán con captadores. Estos captadores se unirán entre sí, al recubrimiento metálico, si existe, y al contenedor del tanque. Cualquiera de los siguientes captadores podrá ser usado: mástiles conductores, hilos tendidos o una combinación de mástiles e hilo tendido.

Tanques a nivel del terreno. Los tanques se conectarán a tierra para conducir la corriente del rayo y para evitar la acumulación de potencial que pueda causar chispas a tierra. El tanque metálico se conectará a tierra mediante uno de los siguientes métodos:

- a) sin juntas aislantes a un sistema de tuberías metálicas conectadas a tierra.
- b) Un tanque cilíndrico vertical descansará sobre el terreno o el hormigón y estará al menos 6 m de diámetro o descansará sobre pavimento bituminoso y estará al menos 15 m de diámetro.
- c) Un tanque se unirá a tierra mediante dos electrodos como mínimo a intervalos máximos de 30 m a lo largo del perímetro del tanque.

Los tanques y tuberías enterrados no requieren de la instalación de captadores.

Conductos

Los conductos metálicos sobre tierra fuera de las instalaciones de producción tienen que conectarse a la red de puesta a tierra cada 30 m mediante un electrodo de tierra superficial o una varilla de tierra.

Los conductos para transportar líquidos inflamables que recorren de gran distancia, tienen que:

- puentearse todas las tuberías penetración incluyendo las tuberías de funda metálica en las secciones de bombeo, de reducción e instalaciones similares, mediante conductores con una sección transversal de al menos 50 mm²;
- los conductores de puenteo tienen que conectarse con terminales soldables especiales o mediante tornillos de ajuste. Las piezas de aislamiento tienen que puentearse mediante vías de chispa.

La cantidad de conexiones de los tanques aislados a tierra, depende de la dimensión horizontal mayor (diámetro o largo):

- hasta 20 m: una vez
- mayor que 20 m: dos veces.

Para baterías de tanques, como las usadas en las refinerías y centros de almacenamiento, los tanques se conectan entre sí y será suficiente la conexión a tierra de cada tanque en solo un punto, independientemente de cual es la mayor dimensión horizontal.

Estructuras con riesgo de explosión

El sistema de protección contra rayo se diseña e instala de manera tal que, en caso de una descarga de rayo directa, no haya efectos de fusión o esparcimiento, excepto en el punto de impacto.

Para la determinación de las ubicaciones de los captadores, debe tenerse en cuenta que pueden producirse chispas en el punto de impacto.

Los conductores de bajada se instalan de forma tal que no se exceda la temperatura de auto-ignición dada por la fuente del área de peligro en aquellas aplicaciones donde no es posible colocarlos fuera de dicha área.

En este tipo de estructuras con peligro de explosión, se prefiere la utilización de configuraciones de puesta a tierra de anillo perimetral o de acero de cimentación. La resistencia a tierra de estructuras que contienen materiales sólidos explosivos y mezclas explosivas deberá ser menor que 10 Ω.

El diseño de la protección contra rayos para estructuras que contienen materiales sólidos explosivos debe tomar en cuenta la sensibilidad del material de acuerdo a la manera en que se usa o almacena. Por ejemplo, hay algunos materiales explosivos insensibles, que no requieren ninguna consideración especial a las ya dadas; sin embargo, existen otros materiales sensibles que son alterados por las rápidas variaciones del campo eléctrico o por el campo electromagnético radiado del impulso del rayo, para los cuales es necesario establecer requerimientos de unión adicional o blindaje. Para estos últimos se recomienda la utilización de un sistema externo de tipo aislado. Se consideran protegidas por un sistema de captura natural, las estructuras totalmente contenidas dentro de una envolvente metálica con un espesor de 5 mm (para el acero) o de 7 mm (para el aluminio).

6.4.7. Protección contra sobretensiones transitorias.

Sobretensiones causadas por rayos.

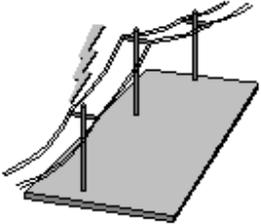
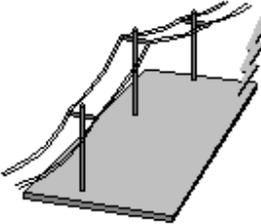
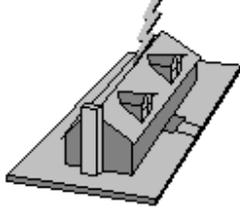
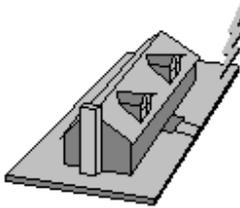
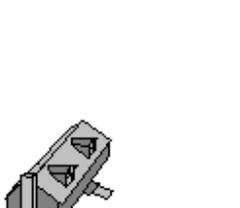
Descarga Directa	Descarga Cercana	Descarga Lejana
 <p data-bbox="368 1352 628 1406">Propagación de la sobretensión por la línea</p>	 <p data-bbox="703 1352 948 1406">Sobretensión inducida en la línea</p>	 <p data-bbox="1023 1352 1267 1406">Sobretensión inducida en la línea</p>
 <p data-bbox="384 1644 628 1697">Sobretensión debida al impacto directo en la instalación</p>	 <p data-bbox="692 1644 952 1697">Acoplamiento resistivo y sobretensión inducida</p>	 <p data-bbox="1023 1644 1267 1697">Sobretensión inducida</p>

Figura 39 Clasificación de las descargas de rayo según su punto de impacto

Las sobretensiones debidas al rayo, según su origen pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- Sobretensiones debido a impacto directo (sobretensión conducida).
 - Impacto directo en líneas de baja tensión.
- Sobretensiones debido a impacto indirecto cercano o lejano (sobretensión inducida).
 - Impacto indirecto en líneas de baja tensión.
 - Impacto indirecto en edificaciones.
- Sobretensiones causadas por acoplamientos con otros sistemas que llevan corrientes del rayo.
 - Acoplamiento resistivo. Es la causa más común de las sobretensiones transitorias y afectan tanto a los cables soterrados como a las líneas aéreas. Ocurren cuando un rayo impacta a tierra y sube el potencial eléctrico de edificios o estructuras eléctricamente interconectadas con ésta.
 - Acoplamiento inductivo. Con la descarga del rayo fluye una gran corriente eléctrica a la que se asocia un campo magnético variable. Si hay cables eléctricos de potencia o señal dentro del campo magnético de dicha corriente, en éstos se induce una tensión. Este efecto de inducción es causado por las descargas entre nubes sobre una línea de potencia o telecomunicaciones o por el impacto directo en el pararrayos de un edificio en el cual el bajante a tierra del mismo, corre paralelo a cables eléctricos de fuerza o señal.
 - Acoplamiento capacitivo. Todo conductor se acopla capacitivamente (capacitancias parásitas) con el resto de los conductores (y también con tierra). Cuando aparece una diferencia de potencial, estas capacidades se cargan y más tarde se descargan por los conductores, provocando corrientes nocivas.

Las sobretensiones inducidas tanto en las líneas eléctricas como de telecomunicaciones, además de ser provocadas por los impactos de rayo en la vecindad de las mismas, pueden deberse a las conmutaciones de circuitos inductivos en los edificios.

La necesidad o no de la implementación de un sistema de protección contra sobretensiones, así como su selección y ubicación, están dados principalmente por el nivel de aislamiento de los receptores eléctricos situados en el interior del edificio así como por los aspectos referentes a los riesgos de transitorios electromagnéticos. Por tanto, la

protección de los sistemas internos contra las sobretensiones requiere de la instalación de SPDs coordinados tanto para las líneas eléctricas como de telecomunicaciones.

Protector contra sobretensiones transitorias (SPD)

Definición

Es un dispositivo que contiene al menos un componente no lineal para limitar la energía de las sobretensiones transitorias derivándola a tierra a través de una vía de baja impedancia con el fin de proteger a otros equipos.

Clasificación de los SPDs

SPD Tipo I (Suge Arrester):

Es un dispositivo de protección usado para limitar las sobretensiones transitorias mediante la descarga o derivación de las corrientes transitorias y también evita la circulación continua de la corriente de seguimiento mientras sea capaz de repetir estas funciones

SPDs Tipos II y III (TVSS):

Son dispositivos de protección con función similar a la anterior, que comienzan a derivar o limitar la corriente transitoria a una tensión mucho más cercana a la tensión de operación. Pueden ser: conectados permanentemente y enchufables.

Aplicaciones de los SPDs

- Líneas eléctricas: Utilizado en la entrada de servicio eléctrico de AC, paneles de distribución secundarios y tomacorrientes a lo largo de una edificación.



Figura 40 Ejemplos de SPDs para sistema eléctrico

- Líneas de telecomunicaciones: Utilizados en las interfaces de salida las centrales telefónicas y de computación, en las líneas coaxiales de los equipos de radiocomunicaciones, CCTV, CATV y en las líneas de telemando y control de los sistemas automáticos industriales.



Figura 41 Ejemplos de SPDs para sistemas de telecomunicaciones

Protección de las líneas eléctricas de AC de baja tensión

La adecuada selección y disposición de los SPD exige, por un lado, la aplicación del principio de protección escalonada y, por otro, garantizar la coordinación energética de los mismos. El objeto es conseguir que, al llegar el equipo, la sobretensión quede lo suficientemente atenuada como para que no produzca ningún deterioro (malfuncionamiento, degradación o fallo) en el mismo.

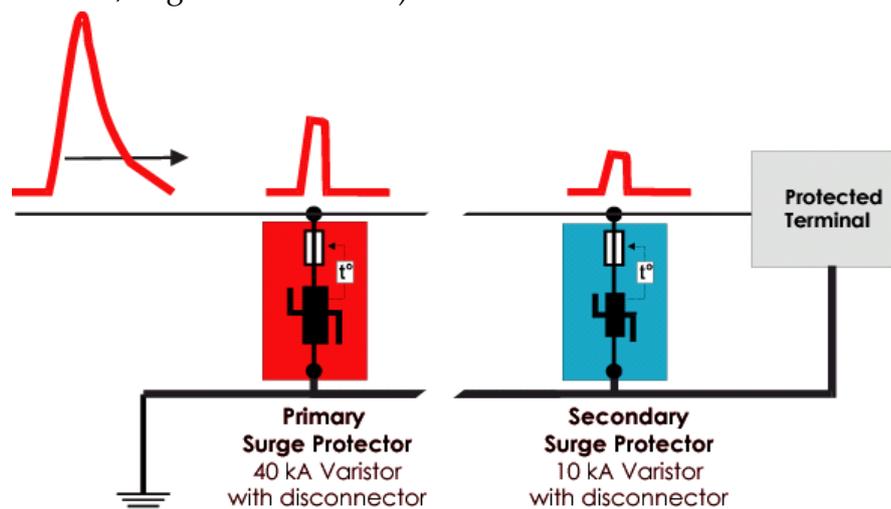


Figura 42 Ejemplo de protección escalonada con SPDs



Una elección y/o disposición errónea de los SPDs supone, por un lado, una protección inadecuada, y por otro lado, la destrucción del propio dispositivo y riesgo de daños importantes en la instalación.

Los SPDs que se instalan a la entrada del servicio eléctrico tendrán una corriente de descarga máxima I_{max} de al menos 40 kA @ 8/20 μ s por fase o tendrán una corriente de descarga nominal I_n de al menos 20 kA @ 8/20 μ s por fase.

El SPD protegerá contra una sobretensión producida por un generador de forma de onda combinada 1,2/50 μ s y 8/20 μ s.

La especificación de corriente de cortocircuito I_{CC} del SPD se coordinará con la corriente de falla disponible del suministro (panel) al cual está conectado, de acuerdo con NFPA 70, *National Electrical Code*.

Ubicación de los SPDs

- Se permite que sean ubicados en el interior o al aire libre.
- Se harán inaccesibles al personal no cualificado.
- En todas las entradas de servicio eléctrico.
- En las entradas de los sistemas de telecomunicaciones conductivos
- En todos los puntos donde los conductores de los sistemas eléctricos y electrónicos abandonen la estructura para servir a otras, si los mismos recorren más de 30 m.
- Se permite su instalación en paneles y subpaneles y en el punto de utilización (tomacorriente o terminación de señal).
- El SPD Tipo I se instala del lado del suministro del dispositivo de desconexión del servicio o como el SPD Tipo II.
- El SPD tipo II se instala como un componente integrado o cerca del panel eléctrico principal del edificio y del lado de carga del dispositivo de protección contra sobrecorriente que desconecta el servicio del edificio o del sistema derivado separadamente.
- El SPD Tipo III (de tipos de tomacorrientes o multitomas con cordón) se monta próximo a los equipos electrónicos para eliminar las sobretensiones residuales de los protectores más robustos previos así como para eliminar las que se generan dentro del edificio.

- Se considerará la instalación del SPD lo más próximo posible al equipo a proteger, para minimizar el efecto de las oscilaciones. La magnitud de la onda reflejada depende directamente de la longitud del conductor entre el protector y el equipo.

Protección de circuitos de telecomunicaciones.

Los SPDs conectarán en todos los sistemas de comunicaciones (incluyendo pero no limitado a CATV, alarma y datos) o de antena a las entradas de la instalación.

Los SPDs serán listados para la protección de los sistemas de señal, datos y comunicaciones y tendrán una I_{max} de al menos 10 kA 8/20 μ s o mayor cuando se instalan a la entrada.

Los SPDs se seleccionarán teniendo en cuenta aspectos tales como frecuencia, ancho de banda y tensión. Las pérdidas (por retorno, de inserción, desacoplamiento de impedancia u otra atenuación) introducida por los SPDs estarán dentro de los límites de operación aceptables.

Los SPDs que protegen los sistemas de comunicaciones se conectarán a tierra y ésta se unirá al punto de tierra del servicio eléctrico.

Si el punto de tierra está a más de 6 m de distancia, se instalará un electrodo de tierra suplementario en la ubicación del SPD.

Donde se provea un electrodo de tierra suplementario o sistema de electrodos se unirá eléctricamente al sistema principal de electrodos de tierra de la instalación en cumplimiento con NFPA 70 (NEC).

Los SPDs no se conectarán a tierra a través de los conductores de bajada del sistema de protección contra rayo.

Los SPDs para la protección de las líneas de telecomunicaciones proveerán protección en modo común.

Selección de los SPDs.

Existen varios Niveles de Exposición para diferentes Categorías de Localización con el fin de ayudar a los diseñadores y usuarios de equipos a hacer una selección adecuada. La combinación en la selección de la categoría de localización y el nivel de exposición brinda el grado de compromiso apropiado entre un diseño conservador y una reducción de la relación costo-beneficio.

La situación puede resumirse en dos escenarios que involucran diferentes niveles de estrés:

Escenario I. En el caso de una descarga de rayo que no involucra directamente a la estructura, pueden ocurrir dos mecanismos de acoplamiento diferentes:

- Sobretensiones acopladas en el sistema eléctrico, directa o indirectamente, y que llegan a la entrada de servicio del edificio de interés, como una descarga directa en el sistema eléctrico interior o adyacente a los edificios alimentados desde el mismo transformador.
- Sobretensiones acopladas inductivamente en el cableado del edificio debido al campo electromagnético que penetran a la estructura.

Escenario II. En el caso de un impacto directo en la estructura (o una descarga a tierra muy próxima a la estructura), existen varios mecanismos de acoplamiento:

- Sobretensiones conducidas por los circuitos eléctricos de AC;
- Sobretensiones inducidas en los circuitos eléctricos de AC;
- Sobretensiones por elevación del potencial local de tierra que provocan la operación del SPD conectado a la entrada de servicio.

Escenario I. Categorías de Localización.

Como primer paso para el tratamiento de de las sobretensiones en el Escenario I, se propone el concepto de categorías de localización. La Figura 43 muestra un diagrama que incluye las transiciones dadas por las características físicas y los componentes del sistema eléctrico. La Tabla 8 presenta las formas de onda recomendadas aplicables y en las Tablas de 9 a 12 se presentan los niveles de estrés que pueden esperarse en cada categoría.

De acuerdo a este concepto, la Categoría de Localización A se aplica a las partes de la instalación a cierta distancia de la entrada de servicio. La Categoría de Localización C se aplica a la parte externa de la estructura, extendiéndose cierta distancia dentro del edificio. La Categoría de Localización B se extiende entre las Categorías de Localización C y A. Como realmente las sobretensiones se propagan de manera continua, la separación en categorías mediante fronteras abruptas constituiría un hecho arbitrario y discutible. En su lugar, el concepto de categorías de localización reconoce la existencia de franjas de transición que conectan las categorías solapándolas. Estas transiciones pueden asociarse con la presencia de un dispositivo o componente identificable: un espacio puede brindar una limitación de tensión por arco y una corriente transitoria puede ser reducida por la derivación a través de un SPD o disminuida por la impedancia del cableado.

Las **Localizaciones** se dividen en tres categorías:

Categoría C.

- Líneas aéreas fuera del edificio y en la entrada de servicio.
- Acometida desde el transformador aéreo hasta el panel eléctrico principal del edificio. Trazado entre el metro y el panel.
- Línea aérea desde el panel principal hasta los equipos que se encuentren fuera del edificio o en otros edificios.
- Línea soterrada a una bomba de pozo

Categoría B

- Equipos dentro del edificio que no se alimenten del tomacorriente de pared.
- Sistemas de paneles eléctricos secundarios que el cable posea un recorrido de separación de 20 m de la categoría C.
- Alimentadores principales y circuitos ramales cortos
- Bus y alimentadores de plantas industriales
- Tomacorriente para grandes aparatos con conexiones cortas a la entrada de servicio
- Sistemas de iluminación de grandes edificios

Categoría A.



- Paneles eléctricos secundarios y tomacorrientes locales a más de 20 m de la categoría C.
- Tomacorrientes y circuitos ramales largos.
- Todos los tomacorrientes a más de 10 m de la Categoría B.

Nota: Los equipos de datos y telefónicos se protegen con categoría C.

Las **Exposiciones** se dividen en dos niveles:

El nivel de exposición del ambiente está relacionado con la exposición del sistema eléctrico a las sobretensiones inducidas.

Bajo: Sistemas en áreas geográficas conocidas por baja actividad de rayos, con poca actividad de conmutación de cargas.

Alto: Aquellas escasas instalaciones que tienen una exposición a sobretensiones mayores. Las condiciones más severas se producen debido a la gran exposición a rayos o sobretensiones de conmutación inusualmente grandes.

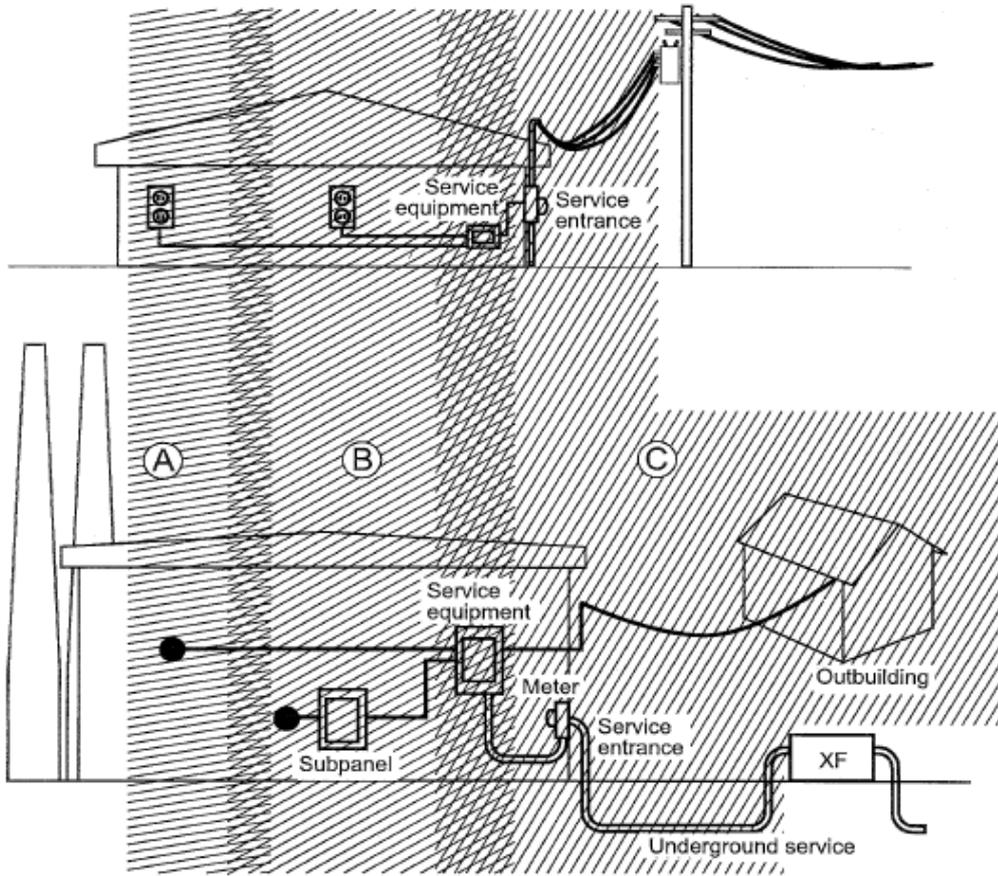


Figura 43 Simplificación del concepto de categorías de localización y transiciones.

Escenario I: sobretensiones que llegan a la estructura provenientes del exterior y generadas en el interior				Escenario II: descargas directas de rayo	
Categoría de Localización	Onda Oscilatoria de 100 kHz	Onda de Combinación	Tensión /Corriente Separadas	Acoplamiento o inductivo	Acoplamiento resistivo
A	Si	Si	-	Categoría B Onda Oscilatoria	Análisis caso por caso
B	Si	Si	-		
C alto	opcional	Si	-		
C bajo	opcional	-	Si		

Tabla 8 Formas de onda de ensayo de sobretensiones aplicables para las Categorías de Localización A, B, y C (solo Escenario I) y parámetros para Escenario II

Categoría de Localización	Valor pico		Impedancia efectiva (Ω)
	Tensión (kV)	Corriente (kA)	
A	6	0,2	30
B	6	0,5	12

Tabla 9 Onda Oscilatoria 0,5 μ s-100 kHz. Máximas sobretensiones y sobreintensidades transitorias esperadas en las Categorías de Localización A y B. Modos monofásicos: L-N, L-G y [L&N]-G. Modos polifásicos: L-L, L-G y [L.s]-G

Categoría de Localización	Valor pico		Impedancia efectiva (Ω)
	Tensión (kV)	Corriente (kA)	
A	6	0,5	12
B	6	3	2

Tabla 10 Onda de Combinación 1,2/50 μ s-8/20 μ s. Máximas sobretensiones y sobreintensidades transitorias esperadas en las Categorías de Localización A y B. Modos monofásicos: L-N, L-G y [L&N]-G. Modos polifásicos: L-L, L-G y [L.s]-G.

Exposición	Ensayos estándares		Ensayos opcionales
	Generador tensión 1,2/50 μ s	Generador corriente 8/20 μ s	
	Mín. tensión de circuito abierto aplicada al SPD	Corriente conducida a través del SPD	
Baja	6 kV	3 kA	Onda Oscilatoria de 100 kHz para la evaluación de respuesta del frente de onda 6 kV
Alta	10 kV	10 kA	6 kV

Tabla 11 Ensayo de Escenario I de SPDs diseñados para Categoría de Localización C

Práctica de conexión del neutro (N) a tierra (G)	Distancia desde la entrada de servicio desde la fuente de perturbación	Sistema expuesto	Perturbación aplicable			
			Onda Oscilatoria 0,5 μ s-100 kHz		Onda de Combinación 1,2/50 μ s- 8/20 μ s	
			Tensión pico (kV)	Impedancia efectiva (Ω)	Tensión pico (kV)	Impedancia efectiva (Ω)
N-G conectados a la entrada de servicio	Próxima	Todos	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
	Cercana	Todos	1	30	Ninguna	Ninguna
	Lejana	Todos	3	30	Ninguna	Ninguna
N-G no conectados a la entrada de servicio	Todas	Bajo	2	12	2	2
	Todas	Medio	4	12	4	2
	Todas	Alto	6	12	6	2

Tabla 12 Formas de onda estándares representativas y niveles máximos de sobretensiones y sobreintensidades transitorias dentro de los edificios para Modo N-G, dependiendo de la práctica de conexión a tierra y unión aplicable.

Formas de onda típicas

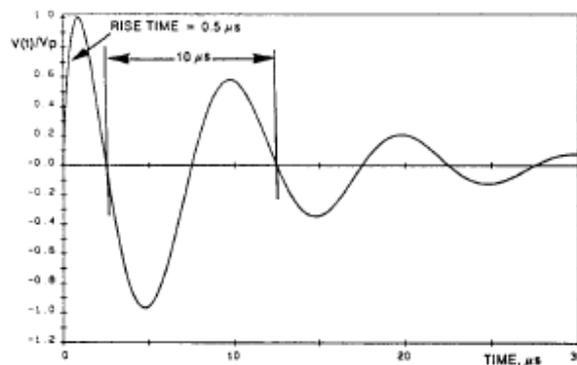


Figura 44 Onda sinusoidal amortiguada (ring wave) 100 kHz

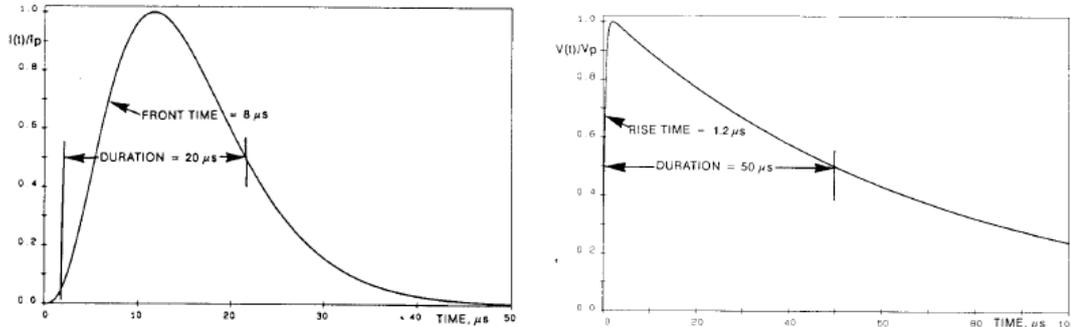


Figura 45 Onda combinada: a) Forma de onda de corriente 8/20 μs ,
b) Forma de onda de tensión 1,2/50 μs

El concepto de categorías de localización descansa en las consideraciones de IEEE Std C62.41.1-2002 sobre la dispersión y propagación de las sobretensiones y sobreintensidades transitorias. Para las sobreintensidades transitorias que se presentan en la entrada de servicio de un edificio, el incremento de la impedancia que se opone a su circulación más allá de ese punto -con o sin efecto palanca del arco en la entrada de servicio- reduce la sobreintensidad transitoria que puede ser inyectada a lo largo de los circuitos ramales. Por el contrario, una sobretensión transitoria en la entrada de servicio de un edificio (a menos que esté limitada por un espacio de arco) puede propagarse prácticamente sin atenuación hasta el extremo de un circuito ramal cuando no existe en este punto una carga de baja impedancia (equipo o SPD local).

Las Categorías de Localización A, B y C corresponden al escenario de transitorios que llegan a la entrada de servicio o que son generados dentro del edificio. Un impacto directo en la estructura produce por inducción sobretensiones y sobreintensidades en los circuitos del edificio. Sin embargo, tales perturbaciones inducidas ocurren durante el frente de elevación de la corriente del rayo y, por tanto, pueden ser representadas mediante perturbaciones de relativamente corta duración que implican una capacidad de deposición de energía relativamente baja, tal como la Onda Oscilatoria de 100 kHz. Las perturbaciones acopladas resistivamente que resultan de un impacto directo (Escenario II) implican largas caídas, tal que su dispersión no es afectada por la inductancia del cableado después de la parte inicial de la perturbación, la cual es el parámetro significativo en el concepto de categoría de localización.

Escenario II. Impacto directo en la estructura.

El Escenario II se propone para describir el caso especial de un impacto directo sobre la estructura o de un impacto a tierra muy cerca de la misma.

Los factores más importantes son:

- densidad de descargas a tierra para la región de interés,
- área efectiva de colección de la estructura,
- distribución estadística de amplitudes máximas,
- relación entre el primer impacto y los impactos subsiguientes y
- dispersión de la corriente del rayo en las trayectorias a tierra disponibles.

Hay dos fenómenos relacionados que ocurren con el impacto directo en la instalación:

- Efecto de inducción de perturbaciones en los circuitos próximos por el alto campo magnético producido por la gran intensidad y rápida elevación en el frente de la onda del rayo. Las perturbaciones resultantes pueden representarse por una onda oscilatoria.
- Efecto de inyección directa de corriente en la red de puesta a tierra.

Un aspecto importante del Escenario II es que, aunque las descargas de rayos a escala global son eventos frecuentes, su probabilidad de ocurrencia para un edificio en particular es baja. En el caso de impacto a tierra muy cerca de la estructura, una parte significativa de la corriente del rayo puede dispersarse directamente en el suelo, mientras que la parte restante es probable que circule por la red de puesta a tierra de la estructura, como si fuera inyectada por un impacto directo, pero con cierta reducción de su amplitud. Por lo tanto, debería realizarse un análisis de riesgo específico que tome en consideración la función del edificio antes de descartar o indicar la necesidad de una adecuada protección contra sobretensiones en este raro escenario para una instalación específica.

Los parámetros de las sobretensiones transitorias definidos por IEC se basan en los estudios del Comité de Estudio 33 de la CIGRE (Conferencia Internacional de Sistemas Eléctricos de Alta Tensión) sobre las propias descargas de rayo, no sobre las sobretensiones transitorias en los circuitos eléctricos de AC del edificio afectado.

La primera descarga de un rayo se caracteriza por tres parámetros:

- Intensidad de la corriente
- Carga de la descarga
- Energía específica

Para la primera descarga del rayo, los parámetros están caracterizados en la IEC 61312-3:2000. La división de la corriente del rayo entre las trayectorias disponibles depende de las impedancias relativas de dichas trayectorias, las cuales pueden variar en un amplio intervalo, como se plantea en IEEE Std. C62.41.1-2002. Se ha demostrado mediante simulaciones numéricas que la forma de onda de la parte de la corriente del rayo que continua hacia el interior del edificio, luego de pasar por los SPDs conectados a la entrada de servicio, es muy similar a la de la corriente del rayo si el modelo postula valores comparables de resistencia de los electrodos de tierra para todos los conductores. En el caso de los sistemas eléctricos con múltiples conexiones a tierra del neutro, la muy baja resistencia ofrecida por los electrodos de tierra múltiples reduce considerablemente la fracción de la corriente del rayo que circula por los SPDs relacionados con la trayectoria de salida. Por lo tanto, cuando se hace el análisis de riesgo, es muy importante considerar las prácticas de puesta a tierra del sistema eléctrico.

Las descargas subsiguientes del rayo tienen menores amplitudes, pero frentes más escarpados. Por lo tanto, éstas son significativas en el mecanismo de tensiones inducidas en los lazos de circuito. Con fines prácticos, dada la respuesta oscilatoria de estos circuitos a un estímulo impulsivo, la onda oscilatoria de 100 kHz puede considerarse como representativa del ambiente para el caso de circuitos internos expuestos a un evento del Escenario II.

Nivel de Exposición

La descripción de la primera base de datos dada en la versión de 1980 de este documento (IEEE Std 587.) incluía una figura que mostraba la razón de ocurrencia contra niveles de tensión *en localizaciones no protegidas*, apoyando a la introducción del concepto de niveles de exposición. A finales de 1990, existían muy pocas localizaciones no protegidas con algún SPD. El nivel de exposición de un ambiente particular y la categoría de localización pueden describirse mejor mediante un diagrama que muestre la frecuencia de ocurrencia de corrientes transitorias en función de su intensidad (o quizá de la capacidad de entrega

de energía). Desafortunadamente, los datos disponibles no brindaban tal información, y el concepto de niveles de exposición seguía siendo cualitativo. La versión de 1991 de este documento intentó cuantificar, mediante un proceso consensuado, el impacto de la exposición mediante tablas donde los valores numéricos para estas tres categorías de localización eran divididos en tres subcategorías. Este intento fue estimado de engorroso por algunos lectores, y muchos proyectistas solo usaron el mayor valor. En consecuencia, las tablas que aparecen en este documento solo muestran una fila de valores para las Categorías A y B. Para la Categoría de Localización C se han mantenido dos niveles de exposición, debido al ancho de la banda de transición que conecta las Categorías de Localización B y C (abarcando los equipos de servicio).

Parámetros del Escenario II

Los parámetros de la corriente del rayo que se definen en las publicaciones de IEC se derivan de los informes del comité de estudio CIGRE. Para las sobretensiones resistivamente acopladas, el mayor interés está en la primera descarga, debido a su gran corriente pico, transferencia de carga y energía específica. Para las sobretensiones inductivamente acopladas, el mayor interés está asociado con la pendiente de elevación y la inductancia mutua entre los conductores que llevan la corriente del rayo (o sea, los derivadores y los conductores no intencionales) y el circuito de interés. Estas diferencias de comportamiento e intereses conducen a dos grupos de parámetros diferentes:

- Sobretensiones resistivamente acopladas del Escenario II

Como el interés primario para las sobretensiones resistivamente acopladas es la capacidad de manipulación de energía de los SPDs involucrados en la trayectoria de salida de la corriente del rayo mediante la conexión al suministro eléctrico, la IEC 61643-1:1998 define un ensayo Clase I que puede aplicarse para evaluar la capacidad de manipulación de energía de dichos SPDs.

- Sobretensiones inductivamente acopladas del Escenario II

Para una sobretensión inductivamente acoplada, el mayor interés está en los impactos subsiguientes, debido a su alta pendiente de elevación (di/dt), particularmente por su efecto en las sobretensiones transitorias inducidas en los circuitos cercanos. Las primeras

mediciones directas de descargas naturales de rayo tenían una capacidad limitada, pero las investigaciones posteriores con descargas provocadas de rayos confirmaron la pendiente de las descargas subsiguientes. La IEC 61312-3:2000 había propuesto un tiempo representativo del frente de $0,25 \mu\text{s}$. La primera parte de la tensión inducida ocurriría entonces con un pico en algún punto durante el tiempo del frente (máximo di/dt). Esta parte de la onda es de gran importancia para los estudios de simulación (ver A.2.2.3 de la IEEE Std C62.41.1-2002). La parte de caída es menos importante debido a su baja pendiente de cambio. Cuando se consideran los efectos combinados de la atenuación y de la frecuencia natural de las oscilaciones para los circuitos en los cuales la tensión se induce por rápidos estímulos iniciales, puede usarse la onda oscilatoria de 100 kHz como representación práctica de estos efectos inductivos.

Además, un solo protector ubicado en la Categoría A con un nivel de exposición bajo no es capaz de manejar toda la energía asociada a la sobretensión transitoria que puede llegar a su punto de instalación. Así como un solo protector ubicado en la Categoría C con un nivel de exposición alto no es capaz de suprimir toda la magnitud de la sobretensión transitoria, dejando pasar una tensión residual que puede dañar el equipamiento electrónico sensible. Por consiguiente, es necesario suprimir dicha sobretensión con varios protectores, o sea, que la protección se realice escalonada o en varias etapas.

La primera etapa de protección tiene que ser capaz de soportar y derivar a tierra la mayor parte de la energía del transitorio y tener una tensión residual soportable por los protectores conectados posteriormente y debe conectarse en la entrada de la edificación. La segunda etapa tiene que derivar la parte restante de la energía de transitoria que resulte de la acción del primer protector y reducir la tensión a niveles tolerables; debe instalarse en el panel de alimentación del local de equipos sensibles. La tercera etapa debe tener en cuenta las exigencias de los equipos a proteger y se ubica próxima a éstos.

Para la instalación de una protección escalonada es necesario conocer lo siguiente:

- Categorías de localización que posee la edificación.
- Conocer los parámetros que permiten seleccionar el protector.

Modos de protección:

- Modo diferencial (la protección actúa entre conductores activos, ejemplo: fase-neutro).

- Modo común (la protección actúa entre conductores activos y tierra, ejemplo: fase-tierra y neutro-tierra).
- Modo diferencial y común (combinación de los dos modos de protección anteriores).

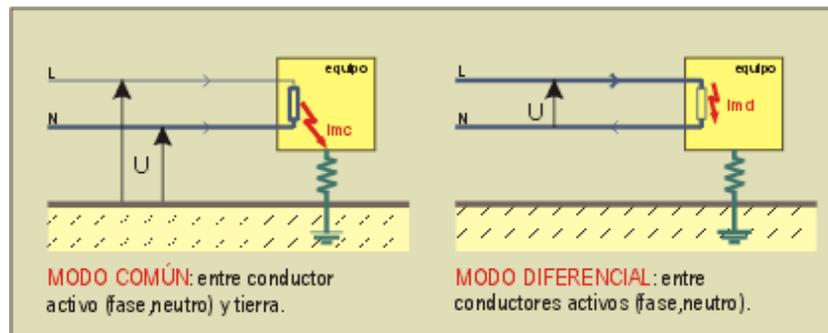


Figura 46 Modos de protección contra sobretensiones

Cantidad:

En cada punto de un circuito que se proteja, se conectará uno por cada conductor no puesto a tierra.

Especificaciones:

- La tensión máxima de operación continua (MCOV) del dispositivo será igual o mayor que la tensión máxima línea-tierra a frecuencia industrial esperada en el punto de aplicación.
- No se instalará en un punto del sistema donde la corriente de fallo sea superior al valor especificado de corriente de cortocircuito. Este requerimiento no se aplicará a los tomacorrientes.
- No se instalará en sistemas no puestos a tierra, conectado a tierra a través de una impedancia o delta con esquina a tierra, a menos que esté especificado para uso en estos sistemas.
- La tensión de supresión (SVR) de los SPD's para cada modo de protección se seleccionará de manera que no sea mayor que los valores dados en la Tabla 8 para los diferentes sistemas de distribución eléctrica a los cuales pueden estar conectados.
- Los SPDs en las entradas de servicio a tierra se conectarán en una configuración línea a tierra (L-G) o línea a neutro (L-N). Los modos adicionales línea a línea (L-L) o neutro a tierra (N-G) se permitirán a la entrada de servicio. Para servicios sin neutro,



los SPDs se conectarán de línea a tierra (L-G). También se permiten las conexiones adicionales línea a línea (L-L).

Sistema de Distribución Eléctrica	L-N	L-G	N-G	L-L
120 2W + tierra	500	500	500	
240 2W + tierra		1000		1000
120/240 3W + tierra	500	500	500	1000
120/208 WYE 4W + tierra	500	500	500	1000
277/480 WYE 4W + tierra	1000	1000	1000	1500
277/480 WYE 4W + HRG (alta resistencia a tierra)				1500
347/600 WYE 4W + tierra	1500	1500	1500	2000
240 DELTA 3W (no conectada a tierra)				1000
480 DELTA 3W (no conectada a tierra)				1500
240 DELTA 3W + tierra (esquina conectada a tierra)		1000		1000
480 DELTA 3W + tierra (esquina conectada a tierra)		1500		1500

Tabla 13 Máximo SVR permitido por Modo de Protección para los diferentes Sistemas de Distribución Eléctrica a los cuales el SPD puede ser conectado

Instalación

- Deberá ser conforme a los requerimientos de NFPA 70, *National Electrical Code*.
- La resistencia de conexión a tierra será lo suficientemente baja para un eficaz funcionamiento del SPD.
- La longitud de los conductores de interconexión del SPD debe ser tan corta como sea posible. La longitud del conductor juega un papel importante en el comportamiento de la protección. En la medida que la longitud del conductor se incrementa, así aumenta la impedancia del trayecto de conducción. Esto produce una caída de tensión adicional que degrada la tensión de protección brindada por el SPD.

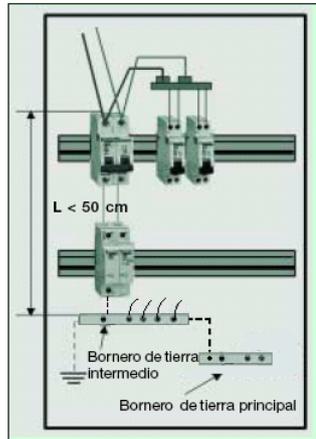


Tabla 14 Longitud de los conductores de conexión del SPD. Regla de 50 cm

- Los conductores de interconexión serán lo más rectos posibles, evitando dobleces agudos e innecesarios, que incrementen la impedancia.

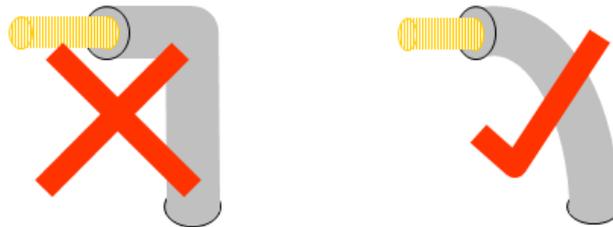


Tabla 15 Curvatura de los conductores de conexión del SPD

- Donde sea posible junte apretadamente los conductores de conexión a las fases y al neutro en toda la longitud; esta es una manera muy efectiva para cancelar la inductancia de los mismos.
- Los conductores de conexión no serán menores que 14 AWG para el cobre o 12 AWG para el aluminio.
- Los protectores en categorías de C a B deben estar separados 15 m como mínimo uno del otro. Los de categorías de B a A deben separarse a 5 m o más.
- En caso que no sea posible respetar la distancia mínima de 15 m entre los protectores ubicados en la categoría de C a B, se conectarían inductancias de desacoplamiento, lo que facilitaría la ubicación de los dos protectores en un mismo panel.
- Los conductores de conexión a tierra no viajaran en envolventes metálicas a menos que sean unidos a ambos extremos del envoltorio.



Características físicas.

Los SPDs se proveerán considerando en ambiente de operación y de acuerdo a las instrucciones del fabricante.

Las carcasas y otros equipos auxiliares estarán listados para este propósito.



6.5. PROTECCIÓN DE INSTALACIONES CONTRA DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS.

La electricidad estática es un fenómeno que cualquier persona habrá experimentado alguna vez en forma de descarga al acercarse a tocar un elemento conductor como el tirador metálico de una puerta después de haber andado sobre un suelo de alfombra o al bajar de un automóvil y tocar la puerta. Igualmente se habrán podido observar destellos al quitarse ropa de tejido acrílico y la atracción del cabello al acercarse a la pantalla de un televisor.

Electricidad estática

Es un desequilibrio temporal en la repartición de las cargas eléctricas en la superficie de dos materiales en contacto por transferencia de electrones, creando un campo eléctrico y una diferencia de potencial entre aquellos que puede ser muy elevada. La magnitud de la carga depende principalmente de la velocidad de separación y/o fricción de los materiales y de su resistividad eléctrica.



Figura 47 Ejemplo de proceso industrial donde se generan cargas electrostáticas

Generación



Para generar electricidad estática es suficiente el contacto o fricción y posterior separación entre dos materiales generalmente diferentes y no necesariamente aislantes, siendo uno de ellos mal conductor de la electricidad. Esta forma de generación de electricidad estática es la más corriente y ocurre muy frecuentemente.

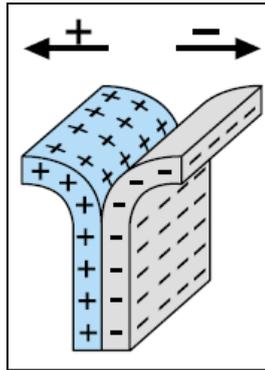


Figura 48 Generación de cargas por triboelectricidad

Así, una cinta transportadora o una banda de papel, tela, etc. al pasar entre rodillos, genera cargas de electricidad estática. También se genera en el trasvase de líquidos no conductores a través de conducciones, al caer a chorro libre, al ser pulverizado a través del aire y cuando el aire u otros gases burbujan a través de tales líquidos. Los disolventes derivados del petróleo, son materiales que fácilmente generan y acumulan cargas electrostáticas habiendo generado accidentes catastróficos por tal circunstancia. Otros ejemplos se suceden con gases que salen a gran velocidad por una boquilla, especialmente si arrastran líquido o partículas sólidas, en el transporte neumático de productos en polvo de piensos, semillas, almidón y metales.

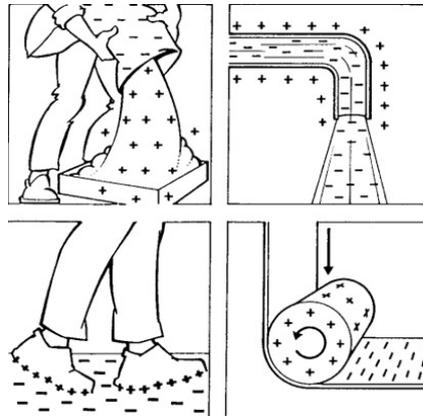


Figura 49 Ejemplos de generación de cargas electrostáticas

Los materiales conductores permiten el paso de cargas eléctricas, mientras los aislantes lo obstaculizan. Las cargas electrostáticas negativas son electrones de los átomos de los elementos químicos y las positivas equivalen a la acción de los protones del núcleo atómico privados de los electrones de la última capa. Los electrones situados en la superficie de un material aislante o un conductor aislado no pueden disiparse fácilmente mientras no tengan una vía conductora a tierra. Al no poder circular con facilidad dan lugar a la denominada electricidad estática, a diferencia de la otra electricidad dinámica que circula por los conductores con fines de transmisión y utilización de energía. Los electrones tienen libertad de movimientos de una molécula a otra en los conductores, pero los protones son inseparables del átomo y no pueden moverse a menos que lo haga el propio átomo. El conjunto de los átomos de los cuerpos sólidos forman estructuras que mantienen la posición de dichos átomos entre sí. En cambio, en los líquidos y mucho más en los gases, existe un desplazamiento relativo entre los mismos. Esa es la razón porque en los sólidos sólo se mueven los electrones y en los líquidos y gases se pueden mover los electrones y los protones. La carga originada por este fenómeno se llama carga triboeléctrica.

La magnitud de la carga electrostática está relacionada con la distancia relativa entre los materiales en la serie y su signo está determinado por la propensión de un material a ceder o ganar electrones que es lo que en realidad indica tal serie. Así, por ejemplo, el frotamiento de una pieza de vidrio y otra de teflón y su posterior separación darán lugar a una carga electrostática negativa sobre la pieza de teflón y otra de igual magnitud y carga positiva sobre la de vidrio. La misma experiencia realizada, por ejemplo, con

poliéster y níquel daría cargas positivas y negativas respectivamente en sus superficies, pero con magnitud menor de la carga eléctrica.

En los líquidos inflamables y combustibles la generación se da principalmente cuando se mueven en contacto con otros materiales en procesos de flujo por conducciones y en operaciones de mezclado, vertido, bombeo, filtración o agitación. La electricidad estática se puede acumular en el propio líquido.

En el flujo de gases el fenómeno se acrecienta cuando están contaminados con óxidos metálicos o partículas sólidas y líquidas. Una corriente de gas en esas condiciones dirigida contra un objeto conductor cargará este último, excepto en el caso en que esté conectado a tierra o conectado equipotencialmente con la conducción de descarga.

En operaciones de manipulación y proceso con polvos y fibras, las descargas electrostáticas causantes de ignición han ocurrido entre un elemento conductor aislado y tierra. No se tiene constancia experimental que una nube de polvo haya tenido ignición por descarga electrostática provocada en su propio seno.

Otra forma de generación de electricidad estática puede ocurrir a partir de la carga previamente originada en la superficie de un material aislante, la cual induce la formación y distribución de cargas eléctricas en un cuerpo conductor que esté próximo. Este fenómeno físico se denomina inducción.



Figura 50 Generación de cargas por inducción

Una persona se acerca y pasa en la proximidad de una cinta transportadora y antes de salir de su influencia, toca un elemento conductor puesto a tierra. La carga inducida más cercana es de signo contrario a la de la cinta y la más alejada es del mismo signo. Esta última queda libre después de haber descargado la carga contraria próxima al punto de

contacto a un elemento conductor puesto a tierra, como puede ser la bancada o estructura metálica de soporte, y puede disiparse si se proporciona una conducción a tierra. Una vez ocurrida esta eliminación, si el cuerpo se aleja, la carga remanente de igual signo al de la cinta se distribuye uniformemente por todo el cuerpo y se puede liberar posteriormente en forma de chispa al aproximarse a un conductor en contacto con tierra.

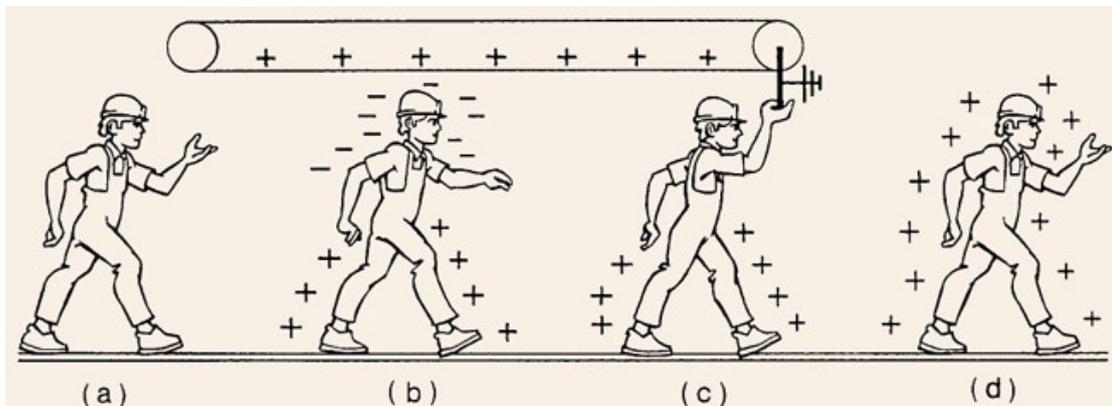


Figura 51 Generación de cargas electrostáticas en personas por inducción

La generación de cargas electrostáticas es un fenómeno natural, asociado a la propia estructura atómica de la materia, que se produce como resultado del movimiento relativo entre dos superficies en contacto, generalmente de sustancias diferentes, tanto líquidas como sólidas, una de las cuales, o las dos, no es buena conductora de la electricidad. Dos son los procesos fundamentales de formación de las cargas: el contacto-separación de sustancias y la fricción.

Acumulación

La fase siguiente a la generación de cargas electrostáticas es la acumulación de las mismas en los materiales no conductores y en los conductores aislados. Esta acumulación puede ocurrir en productos, equipos de proceso, tramos de tubería aislados, recipientes, personas con calzado aislante o sobre suelos que no disipan las cargas. A mayor cantidad de cargas electrostáticas corresponde mayor diferencia de potencial respecto a tierra.

Cuando los cuerpos conductores están separados por un aislante o incluso por el aire constituyen un condensador al quedar cargados uno con una carga positiva y otro con otra carga igual pero negativa.

Disipación

La disipación de las cargas electrostáticas depende de la conductividad entre el cuerpo cargado y su camino de conexión a tierra. Una buena conductividad da lugar a la rápida desaparición de las cargas electrostáticas al mismo tiempo de su generación con lo cual ni siquiera se llega a su acumulación.

Descarga

Si la generación y acumulación de cargas continúa se llega a una situación en que es inevitable la descarga electrostática. El fenómeno ocurre especialmente cuando el cuerpo cargado se acerca a un elemento conductor con un cierto grado de conductividad a tierra. En ese momento la intensidad del campo eléctrico existente sobrepasa la rigidez dieléctrica del aire y se genera una chispa visible y audible en muchos casos.

Al establecerse una vía conductora se libera la energía almacenada, descargándose y produciendo posiblemente una chispa. Es esta recombinación brusca mediante chispa entre las cargas separadas la que constituye el riesgo.

Generalmente tales chispas, denominadas técnicamente descargas disruptivas, se producen a través del aire entre un cuerpo cargado eléctricamente y un cuerpo próximo no cargado, pero conectado eléctricamente a tierra, al encontrarse ambos a una distancia muy corta. A menor distancia también menor es la tensión necesaria para que se produzca la chispa.

- Las cargas estáticas usualmente se disipan o se neutralizan sin que lleguen a ser peligrosas. En cambio si hay presentes vapores inflamables o partículas finamente divididas, como fibras secas o polvo, las chispas estáticas pueden causar incendio o explosión.

- Los combustibles sólidos o líquidos no pueden ser simultáneamente vaporizados y encendidos por la energía que normalmente produce una chispa electrostática, a menos que se encuentren finamente divididos en forma de niebla o polvo. Por consiguiente, si no hay vapores o polvos, existe poca o ninguna posibilidad de que se produzca un fuego.

Electricidad estática en líquidos inflamables

Al moverse los líquidos que están en contacto con otros materiales se genera electricidad estática. Así ocurre generalmente en el paso de líquidos por el interior de tuberías y en el mezclado, vertido, bombeo, filtración o agitación de líquidos.

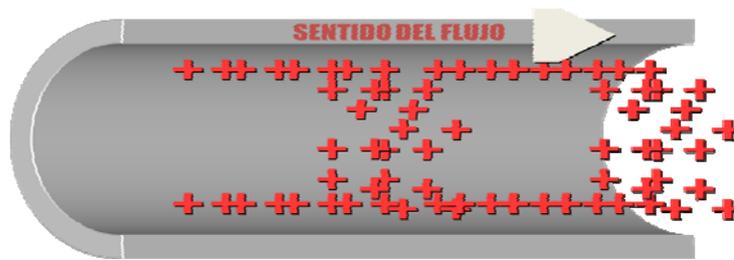


Figura 52 Carga electrostática por movimiento de fluidos

- Cuando no hay flujo, las cargas se neutralizan alrededor de la superficie de contacto combustible-tubería.
- Cuando hay flujo, las cargas estáticas se originan por los iones del fluido, son arrastradas por la corriente y las cargas opuestas en la tubería quedan libres para ser conducidas a tierra inofensivamente.

Pocos productores de estática: alcoholes, asfaltos, aceites residuales, productos solubles en agua, productos que contengan aditivos antiestáticos, los crudos y todos los destilados que tengan un residuo de carbón mayor al 1%.

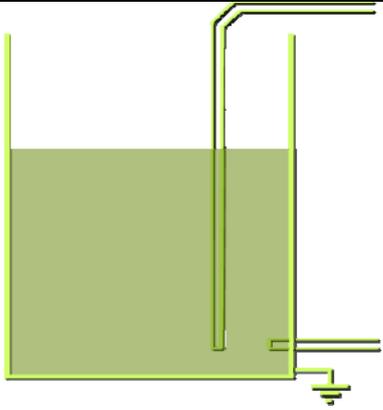
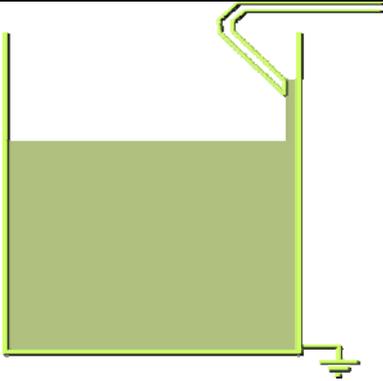
Productores de estática: productos refinados, excepto los anteriores, como: petróleo, hidrocarburos líquidos, queroseno y otros tantos disolventes corrientes.

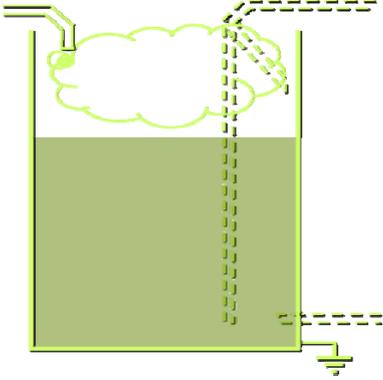
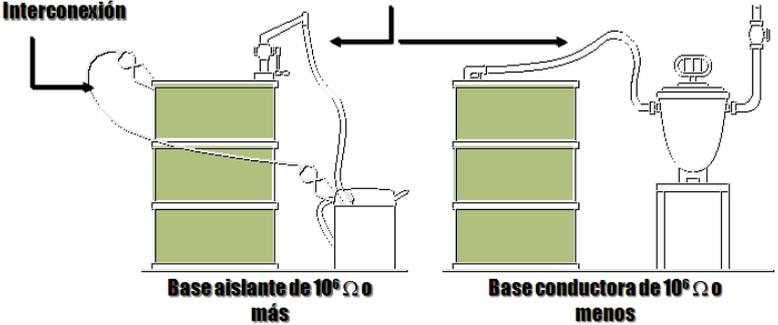
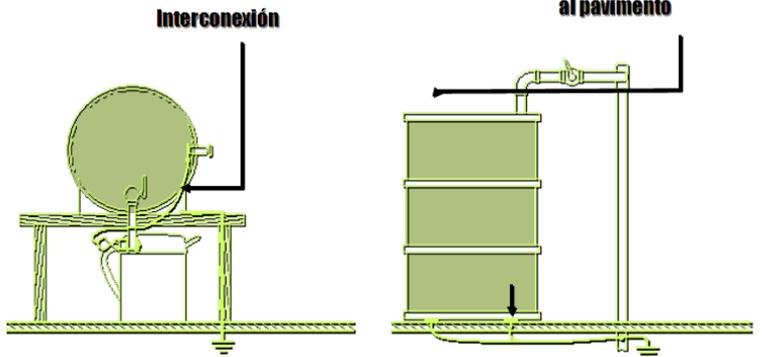
En ciertas condiciones, particularmente cuando se trata de hidrocarburos líquidos, se puede acumular bastante electricidad estática. Si esta acumulación es de magnitud



suficiente pueden producirse chispas de descarga. Si se produce una chispa en presencia de una fuente inflamable de aire y vapor, tendrá lugar una ignición. Por tanto, deben darse los pasos necesarios para impedir que las dos condiciones se produzcan simultáneamente.

Las espumas y nebulizaciones de líquidos inflamables y combustibles, al igual que los polvos, pueden arder por chispas estáticas. En estos casos, la ignición es posible aunque el líquido nebulizado esté por debajo de su punto de inflamación.

Medidas de seguridad para el llenado de un tanque con un líquido inflamable	
Usar un cable de conexión del tanque a tierra y la boca de descarga estará por debajo de la superficie.	
Usar un cable de conexión del tanque a tierra y la boca de descarga a un ángulo de 45° para que el líquido baje por un la pared interior del mismo.	

<p>Usar un cable de conexión del tanque a tierra y cubriendo el líquido con un gas inerte.</p>	
<p>Antes del llenado y durante toda la operación establecer y mantener contacto entre el tanque y la boca de descarga mediante un cable de interconexión, para eliminar cualquier diferencia de potencial.</p>	<p style="text-align: center;">La manguera puede ser conductora o no conductora</p>  <p style="text-align: center;">Interconexión</p> <p style="text-align: center;">Base aislante de $10^8 \Omega$ o más Base conductora de $10^8 \Omega$ o menos</p>
<p>Usar cable de interconexión, excepto cuando los recipientes ya lo están o el sistema de llenado está siempre en contacto metálico con el recipiente durante la operación de carga.</p>	 <p style="text-align: center;">Interconexión Bandas metálicas unidas al pavimento</p>

Dentro de un recipiente puede producirse una carga superficial debido a:

- La entrada pulverizada o en salpicadura del chorro.
- La agitación del agua del fondo al penetrar el chorro.
- Las burbujas creadas por el paso del aire o gas a través del líquido.
- Las mezclas producida en el interior del depósito.

Para la eliminación de la carga superficial es necesario esperar un tiempo, denominado de relajación, que puede variar desde una fracción de segundo hasta varios minutos, dependiendo fundamentalmente de la resistividad del líquido.

Los casos más comunes donde se presenta el fenómeno de carga superficial son en:

- Camiones cisterna aislados de tierra a través de los neumáticos

El peligro principal está en el salto de chispa del borde del orificio de llenado hacia la tubería de alimentación que está al mismo potencial de tierra. Este riesgo puede eliminarse interconectando el recipiente a la tubería de alimentación antes de comenzar la carga, sin interrumpir la conexión hasta que se haya terminado la operación.

- Depósitos ordinarios con resistencia a tierra inferior a 1 MΩ.

En este caso las cargas que se forman en la superficie de un líquido no pueden evitarse con la interconexión ni con la puesta a tierra. Si existiese la posibilidad de que hubiera una mezcla inflamable en la superficie del líquido, la carga estática puede contrarrestarse por medio de: 1) inertización de la cámara de vapores, desplazando parte del oxígeno con un gas inerte adecuado o aumentando la concentración de gas inflamable en la cámara de vapor de modo que se sobrepase el límite superior de inflamabilidad y 2) empleo de aditivos que incrementen la conductividad, eliminando rápidamente la carga superficial e impidiendo la formación de un potencial peligroso. El tiempo de relajación se hace menor.

Electricidad estática en gases

Los gases que no están contaminados con partículas sólidas o líquidas generan muy poca o ninguna electricidad cuando fluyen. Cuando un gas que fluye por algún conducto está contaminado con óxidos metálicos, partículas escamosas, partículas líquidas o pulverizaciones, puede electrificarse. Un chorro de gas portador de partículas, dirigido contra un cuerpo conductor, puede cargar a éste, a no ser que esté puesto a tierra o interconectado con la tubería por donde fluye el gas.

Gases que generan electricidad estática

- Escapes de aire o de vapor de agua que contengan partículas de vapor condensado.

- El anhídrido carbónico descargado en forma de líquido a alta presión a través de un orificio, en el dispositivo de descarga y en el recipiente donde se recibe ésta.
- El aire comprimido o el vapor de agua contaminados, en los contactos con orificios.
- El hidrógeno en estado contaminado.
- Los gases licuados del petróleo cuando están en una fase mixta.

Electricidad estática en polvos y fibras

El polvo no sólo participa en la generación de las cargas sino que también es el material que resulta inflamado por las chispas que se desprenden. La suspensión de partículas combustibles finamente pulverizadas en el aire tiene propiedades muy parecidas a las de las mezclas de aire con gas inflamable. Puede arder con efectos explosivos. Existe un límite inferior de inflamabilidad, aunque no se puede definir claramente el límite superior.

El polvo desplazado de una superficie en la que esté reposando puede causar una carga electrostática considerable. La magnitud de la carga depende de las propiedades inherentes a la sustancia, de las dimensiones de las partículas, del área de contacto superficial, de la conductividad de la superficie y de la resistencia y disposición de las cargas del sistema.

Las superficies lisas desarrollan cargas mayores que las ásperas, probablemente debido a un mayor contacto superficial inicial, caso en el cual la electrificación se desarrolla durante la primera fase de separación.

Normalmente no puede impedirse la generación de cargas electrostáticas en el polvo en movimiento. Ni la alta humedad, ni la puesta a tierra de la superficie sobre la que se dispersa el polvo eliminan la generación de cargas.

El método de dispersión del polvo, la cantidad de energía empleada en la dispersión, el grado de turbulencia y la composición de la atmósfera no suelen afectar tampoco la magnitud ni la distribución de las cargas.

Ignición de polvos con las descargas electrostáticas

- En las nubes de polvo existe una concentración mínima por debajo de la cual no se produce ignición, independientemente de la magnitud de la energía de la chispa. A la concentración mínima de polvo se requiere una energía relativamente alta para provocar la ignición, mientras que a concentraciones más altas (de 5 a 10 veces el mínimo), la energía requerida para la ignición es mínima.
- Una descarga estática puede inflamar una capa de polvo combustible en reposo, que arde con una llamarada brillante, en incandescencia o, en el caso de algunos polvos metálicos, con llamas. Aparentemente hay poca correlación entre las energías mínimas necesarios para la ignición del polvo en capas o en nubes. Las capas de algunos polvos metálicos, como el aluminio, el magnesio, el titanio y el zirconio, requieren menos energía para entrar en ignición que los materiales carboníferos.

6.5.1 Peligros ocasionados por la electricidad estática.

Los posibles riesgos son:

- Riesgo de incendio y de explosión, si la descarga ocurre en presencia de una atmósfera inflamable (niebla, vapor o gas inflamable o polvo combustible en el aire).
- Molestias por descargas electrostáticas entre las personas y entre las mismas y otros objetos conductores cercanos.

El peligro más destacable es el de incendio o explosión de atmósferas constituidas por mezclas de aire con vapores, nieblas, gases o polvos combustibles. Éste puede dar lugar a accidentes en las operaciones y procesos con esas materias, cuando la cantidad de cargas electrostáticas origina un potencial eléctrico elevado que puede dar lugar a la descarga electrostática.

Esta descarga electrostática puede ser el foco de ignición de una atmósfera explosiva, dependiendo por su parte de la energía que posea y siempre que ésta sea igual o superior a la energía mínima de ignición de la atmósfera explosiva presente. La experiencia demuestra que chispas insignificantes poseen energía suficiente para inflamar mezclas de vapores y gases inflamables con aire. Las atmósferas explosivas de polvos combustibles necesitan descargas algo mayores.

El cuerpo humano es un buen conductor, y en ambientes con humedad relativa baja, acumula cargas electrostáticas que dan lugar a un potencial de varios miles de V. Estas cargas se generan por contacto del calzado con suelos aislantes o en las propias operaciones de fabricación. La ropa utilizada tiene mucha influencia en la generación de electricidad estática. Las prendas de seda, lana y fibra sintética constituyen un peligro al despojarse de ellas. Esta situación es particularmente peligrosa en quirófanos, instalaciones de fabricación de explosivos y ocupaciones similares.

Condiciones para que la electricidad estática se convierta en fuente de ignición:

- Existir medios efectivos de generación de electricidad estática
- Existir medios que acumulen las cargas separadas y que mantengan un adecuado diferencial de potencial eléctrico.
- Producirse la descarga en forma de chispa de energía suficiente.
- Ocurrir ante la presencia de un material o un ambiente que pueda entrar en ignición.

Teniendo en cuenta que una descarga electrostática sólo puede ser foco de ignición si está en presencia de una atmósfera inflamable, se concluye que la mejor medida de prevención es evitar la formación de mezclas explosivas. Sin embargo, esta medida puede presentar dificultades de aplicación.

El parámetro fundamental determinante de la peligrosidad de una chispa es la cantidad de energía liberada en el instante de producirse. Esta energía se manifiesta en forma de radiaciones (que hacen visible la chispa), de ionización y de calor. Esquemáticamente esta última es la desencadenante de la reacción de combustión.

Es relativamente fácil que se inicie el incendio cuando se libera la energía de activación que aportan las chispas, normalmente superior a la que se precisa para la combustión de gases y vapores, que suele ser del orden de 0,25 mJ. El peligro de inflamación existe cuando la chispa es generada por una diferencia de potencial superior a los 1 000 V.

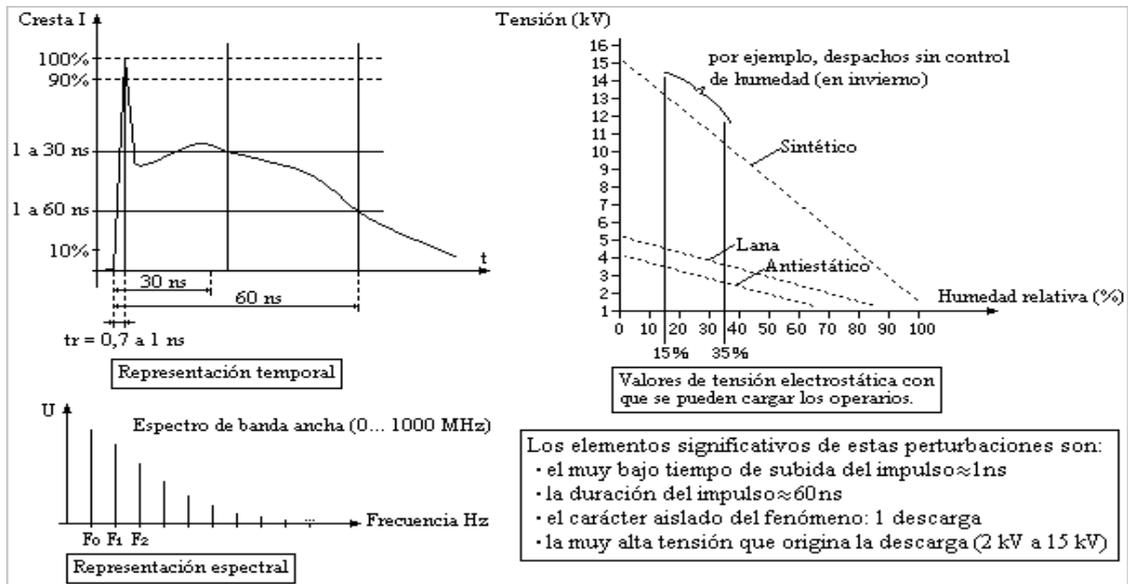


Figura 53 Generalidades de las descargas electrostáticas

6.5.2 Medidas preventivas y de protección frente al riesgo de la electricidad estática.

Las medidas preventivas tienen por objeto evitar la existencia de atmósferas inflamables y controlar que la generación de cargas sea lo más baja posible.

Las medidas preventivas de protección que tienen por objeto controlar las descargas disruptivas, a fin de evitar que éstas se produzcan o que no sean peligrosas, en caso de producirse.

- Interconexiones equipotenciales y conexiones a tierra: Asegurar que las cargas que se formen puedan eliminarse fácilmente sin ocasionar peligro. Esto se logra fundamentalmente mediante la interconexión de todas las superficies conductoras sobre las que se puede formar electricidad estática y estando a su vez el conjunto conectado a tierra. La conexión equipotencial será entre el recipiente a vaciar, el equipo de bombeo y sus conducciones, y el recipiente a llenar.

En realidad un cuerpo conductor puede considerarse conectado a tierra cuando permanezca conectado a otro que ya esté puesto a tierra. Esto puede lograrse fácilmente

conectando la instalación fija a la puesta a tierra y depositando los recipientes móviles sobre suelo conductor durante el trasvase.

La resistencia de la puesta a tierra debe ser baja. Se considera resistencia aceptable frente al riesgo en cuestión, la que sea inferior a $10^6 \Omega$, ya que en realidad las corrientes eléctricas que se pueden generar son de muy baja intensidad (del orden de μA). En tal sentido cualquier puesta a tierra válida para la protección contra contactos eléctricos indirectos también lo será frente a las descargas electrostáticas, aunque es aconsejable su diferenciación. Las interconexiones y la puesta a tierra además de ser de materiales conductores requieren disponer de suficiente resistencia mecánica, protección frente a la corrosión y suficiente flexibilidad, especialmente para aquellas conducciones que requieran su frecuente conexión y desconexión.

Esta puesta a tierra es una medida esencial y a menudo suficiente. La resistencia eléctrica de fuga a tierra de las unidades de una planta no debe superar $1 \text{ M}\Omega$ ($10^6 \Omega$) en las condiciones más desfavorables. En ausencia de cantidades elevadas de cargas electrostáticas o de explosivos se puede llegar a aceptar hasta $10^8 \Omega$ en condiciones de humedad relativa baja o con formación lenta de capas aislantes. El total de la resistencia volumétrica presentada por el calzado y la resistencia de fuga a tierra no debe superar $10^8 \Omega$. Estas mediciones requieren instrumentos especiales y se deben realizar por personal adiestrado.

La conexión equipotencial entre diversos equipos evita la posible existencia de diferencias de potencial entre elementos conductores. La puesta a tierra se puede hacer directamente o a través de la conexión equipotencial con otro elemento conectado a tierra. Las tuberías enterradas y los tanques de almacenamiento apoyados sobre el terreno se consideran puestos a tierra. No debe haber pinturas o recubrimientos aislantes que interrumpen la continuidad de la trayectoria a tierra. Si así fuera, deberían establecerse las conexiones en metal a la vista y un cable de puesta a tierra conectado a una toma de tierra prevista para este fin.

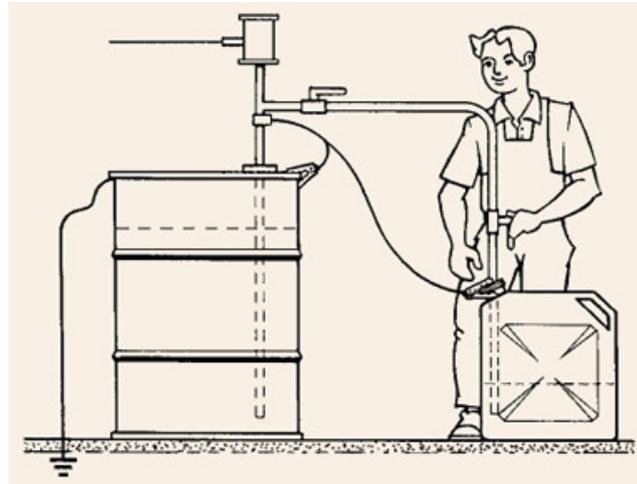


Figura 54 Ejemplo de conexión equipotencial y puesta a tierra en el trasvase de líquidos inflamables

- Aumento de la conductividad de los materiales: Las medidas que ayuden a incrementar la conductividad de los materiales, de sus superficies y del aire, favorecen la disipación de las cargas electrostáticas. Entre estas medidas se incluye la adición de aditivos de negro de humo a la goma de neumáticos, mangueras y cintas de transportadoras y aditivos de carbono, grafito y otros productos conductores para reducir la resistencia eléctrica de asfaltos y suelos sintéticos. Estos suelos con aditivos pueden utilizarse en lugares de trabajo con riesgo de explosión, pero advirtiéndolo que pueden perder su efectividad con el tiempo por la descomposición y 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 y conexión equipotencial de los elementos conductores.
- Ropa de trabajo del personal: El personal que trabaje en instalaciones en las que se efectúen transvases de líquidos inflamables, en donde se debe evitar la acumulación de tales cargas en el cuerpo humano, no usará ropa de fibras sintéticas y de seda, rayón y lana, sino que será preferiblemente de algodón o de tejidos comercializados como antiestáticos, incluso la ropa interior. El calzado y, en su caso los guantes, deberán ser conductores. Ello ofrecerá protección suficiente siempre que el suelo sea también conductor. Los zapatos corrientes, con suela de cuero, ofrecen -sobre todo si hay humedad suficiente- conductividad elevada. Cuando se usen otros materiales aislantes

conjuntamente con la suela de cuero es recomendable usar remaches metálicos que atraviesen la suela del zapato.

- Control de atmósferas inflamables: Todo líquido inflamable contenido en un recipiente abierto y con temperatura por encima de su punto de inflamación emite una cantidad de vapores capaz de formar con el aire mezclas inflamables. Por esto es necesario tener en cuenta que el riesgo no estará suficientemente controlado si sólo se trata la eliminación y control de los focos de ignición, ya que aparte de la electricidad estática pueden ocurrir otros.

Para evitar la formación de atmósferas inflamables se empleará uno de los siguientes métodos:

Empleo de gas inertizante: La cantidad de gas inertizante a aportar está en función del tipo de gas empleado y de los vapores inflamables existentes, lo que exige reducir el contenido del oxígeno por debajo del nivel mínimo para cada caso. Para la mayoría de líquidos combustibles es en general suficiente reducir la proporción del oxígeno del aire a un 11%. A fin de evitar que el consumo del agente inertizante sea excesivamente alto se utiliza un sistema de vaciado con atmósfera en circuito cerrado, incorporando válvulas de regulación automatizadas para admitir o expulsar el gas inertizante a medida que el nivel del líquido en el recipiente disminuya o aumente. En el almacenamiento de líquidos bajo gas protector y en los depósitos de techo flotante, no se precisan medidas preventivas adicionales.

Ventilación forzada: Consiste en asegurar que la atmósfera interior de un recipiente abierto se sitúe por debajo de su límite inferior de inflamabilidad. Se trata de lograr, mediante el aporte del suficiente caudal de aire exterior realizando un barrido uniforme de la atmósfera interior, que se contrarreste la cantidad de materia inflamable evaporada, consiguiendo una concentración ambiental por debajo del 20% de dicho límite.

- Control de la humedad relativa del aire: Siempre que sea posible, se mantendrá una humedad relativa por encima del 60%, en ambientes que puedan ser inflamables. Si la humedad es alta, existirá una ligera película de humedad en todas las superficies que les

suministrará una conductividad eléctrica elevada y facilitará la eliminación de cargas estáticas a través del medio ambiente a medida que se generan.

La máxima efectividad se consigue con una instalación de humidificación integrada en el aire acondicionado, para que la humedad relativa tenga tiempo suficiente para aumentar. En caso de una instalación de climatización que no disponga de regulación de la humedad relativa, se pueden instalar aparatos independientes de humidificación que incrementan este parámetro, teniendo en cuenta que con la misma cantidad de vapor de agua producido, un valor aceptable de humedad relativa se alcanza más fácilmente con temperaturas más bajas, siendo contraproducente una temperatura excesiva de calefacción. A este respecto un factor de importancia es la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de los edificios, particularmente en invierno. La climatización toma el aire del exterior y lo calienta y aunque el contenido de vapor de agua puede mantenerse sin cambio, la humedad relativa disminuye. Por esta razón, las condiciones climáticas de invierno favorecen la generación y acumulación de cargas electrostáticas en interiores.

Una forma de acelerar el aumento de conductividad consiste en pulverizar gotas de agua cargadas electrostáticamente. Por ejemplo, la aplicación a láminas delgadas de papel de agua pulverizadas cargada positivamente sobre un lado y negativamente sobre el otro.

En algunas ocasiones se puede aumentar la humedad del polvo con rociado de agua. Sólo se puede añadir si no es perjudicial para el proceso por efectos de reacción o descomposición.

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 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 paño antiestático humedecido con la disolución. Las capas creadas de esta forma son solubles en agua y se van con el uso, por lo que se debe realizar un tratamiento periódico, generalmente semanal.

- Aumento de la conductividad del aire por ionización: La disipación de cargas electrostáticas se puede conseguir, sin contacto entre cuerpos, mediante ionización del aire en las proximidades del objeto cargado. En esas condiciones, el aire se hace suficiente conductor para disipar las cargas electrostáticas. Los dispositivos empleados reciben el nombre de ionizadores, neutralizadores o eliminadores de electricidad estática. Para su utilización se deben considerar los problemas técnicos que se pueden presentar, como las condiciones ambientales (polvo, temperatura, etc.) y de localización del dispositivo en relación al material que se trabaja, piezas de las máquinas y personal.

Esta ionización se consigue con radiaciones ionizantes, con neutralizadores de electrodos a alta tensión, con neutralizadores de electrodos puntiagudos conectados a tierra y con neutralizadores de llama abierta.

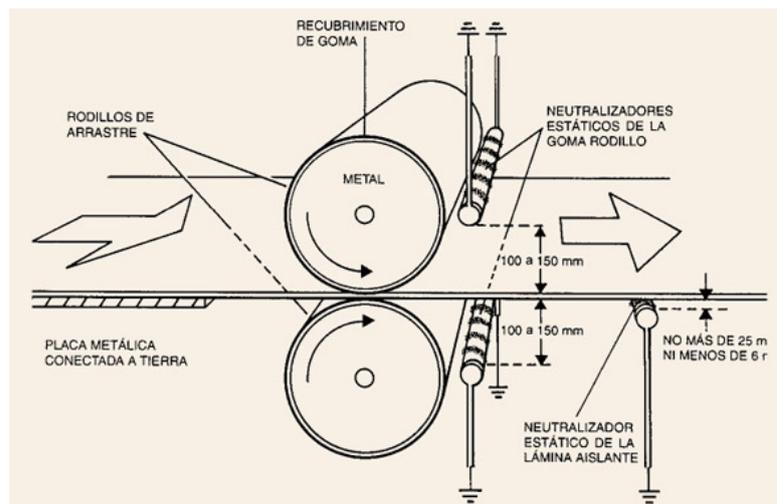


Figura 55 Ejemplo de neutralizadores estáticos en la proximidad de rodillo y lámina

- Reducción de la concentración de oxígeno: La introducción de un gas inerte en un recipiente, operación llamada inertización, se basa en la reducción del porcentaje de oxígeno por debajo de la concentración límite de oxígeno. Esta concentración depende de cada sustancia. El gas más utilizado para la inertización es el nitrógeno.
- Reducción de las velocidades de paso de los materiales: Esta disminución reducirá el ritmo de generación de electricidad estática y se deberá considerar si comercialmente es

aceptable, a causa de una menor producción. Como ejemplos se puede aplicar a la reducción del ritmo de extrusión de películas plásticas, al movimiento de materiales colocados en una cinta transportadora o al caudal de líquidos en una tubería.

- Instalación de elementos no conductores de descargas electrostáticas de las personas: Para evitar el inconveniente y molestia en 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, cabe la posibilidad de evitar totalmente la presencia de elementos conductores, empleando por ejemplo barandillas no metálicas, manillas aislantes de puertas y otras barreras no conductoras.
- Instalación de elementos conductores de descargas electrostáticas de las personas: Es una medida contraria a la anterior y se puede aplicar para descargar a las personas antes de entrar o iniciar una operación con líquidos inflamables. En la práctica se suele hacer con una placa metálica conectada a tierra para ser tocada por las personas que lleven a cabo estos trabajos. Para evitar la molestia dolorosa de la descarga a través de la punta de un dedo, en que la densidad de corriente es muy elevada, de ahí la sensación dolorosa, se puede recurrir a una llave o herramienta. La corriente discurre por toda la mano que agarra la herramienta y se reduce la densidad de corriente en la piel. En lugares con suelos de material aislante y como medida complementaria a los aditivos añadidos a los productos de limpieza y la humidificación del ambiente, se pueden colocar alfombrillas antiestáticas (debidamente conectadas a tierra) debajo de fotocopiadoras y otras máquinas para descargarse por los pies antes de tocar las partes metálicas con las manos. Para operaciones afectadas por la presencia de cargas electrostáticas en puestos de trabajo fijos y sin desplazamientos, se comercializan muñequeras y tobilleras conectadas por cable a una puesta a tierra.
- Elección adecuada de los materiales en contacto: Se trata de reducir la cantidad de cargas generadas por dicho contacto. Esta medida se puede aplicar cuando se tiene una gama amplia de materiales a elegir. Con ella se trata de evitar que entren en contacto materiales que tengan afinidades electrónicas muy diferentes, que son los que están muy separados en la serie triboeléctrica. Por ejemplo, evitar el contacto entre vidrio y teflón (PTFE) o entre cloruro de polivinilo (PVC) y poliamida (nylon).

- Reducción de la presión de contacto entre los materiales: Con esta medida se disminuye la transferencia de cargas electrostáticas, porque a menor presión se tiene menor área efectiva de contacto.
- Control adecuado de la temperatura de contacto de las superficies: La generación de cargas electrostáticas se da en dos superficies de un mismo material a diferentes temperaturas. La temperatura de las superficies de contacto es un factor fundamental y determinante en la transferencia de electrones.

Normalmente es necesaria la combinación de varias medidas, especialmente si una no es suficiente para conseguir los resultados deseados.

Todas las medidas de prevención y protección anteriormente indicadas serán efectivas si se puede asegurar su aplicación y control mediante la capacitación del personal expuesto al riesgo y el empleo de procedimientos de trabajo seguros cuyo cumplimiento sea verificado periódicamente.

Resumen de medidas para reducir los riesgos de incendio y/o explosión debido a las descargas electrostáticas:

- Verificar que el llenado de los tanques se realice como está indicado y que, en ningún caso, el líquido vertido caiga a través del espacio de vapores del recipiente.
- Controlar la velocidad del flujo hacia el recipiente, evitando las turbulencias.
- Ubicar los filtros-separadores, si el sistema los tiene, lo más retirados posible y antes del recipiente, para permitir el relajamiento de las cargas estáticas que puedan originarse.
- Existir los medios para efectuar las uniones equipotenciales pertinentes entre los puntos de carga y descarga de tanques y carros cisterna y las conexiones de éstos a tierra.
- No introducir en los recipientes, cintas de medición, cadenas o frascos para muestras, durante la primera media hora siguiente al llenado (en el caso de un recipiente de almacenamiento) y durante al menos un minuto (en el caso de un carro cisterna).
- Realizar el trasvase de líquidos inflamables o combustibles entre recipientes en presencia de una conexión equipotencial entre ambos y a tierra.



- Usar recipientes de seguridad para manejar líquidos inflamables en pequeñas cantidades.
- Garantizar que los cuerpos flotantes y otros en el interior del recipiente se encuentren conectados eléctricamente con el cuerpo del recipiente.
- Evitar cuerpos con salientes agudos en el recipiente, especialmente los que se proyectan del techo y al interior de dicho recipiente.
- Agregar aditivos antiestáticos a los líquidos almacenados, cuando sea posible.
- Evitar el bombeo de mezclas de agua-combustible.
- Controlar de los derrames de líquidos inflamables y limpiarlos inmediatamente cuando se produzcan.
- Existir medidores de campo electrostático, cuando se justifique.

Bibliografía

1. Antonio de Montoliu Gili "El fuego y la electricidad en instalaciones de baja y alta tensión". Editorial MAPFRE, S. A., Madrid, España, 2001.
2. Manual de Protección Contra Incendios. NFPA. 16 Edición. Editorial MAPFRE, S. A., Madrid, España, 1991.
3. Antonio de Montoliu Gili. "Guía de Prevención de Incendios de Origen Eléctrico". DT-41. Editorial CEPREVEN, Madrid, España, 2004.
4. IEEE C62.41-2 "Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits", ANSI, USA, 2002
5. NFPA 70 "National Electric Code", USA, Edition 2008.
6. NFPA 780 "Standard for the Installation of Lightning Protection Systems", USA, Edition 2008.
7. Amores, F. "Curso de Certificación de la especialidad de Sistemas de Protección contra Rayos". APCI, Habana, 2007.
8. Manuel Bestratén Belloví "Electricidad estática en el trasvase de líquidos inflamables", Nota Técnica de Prevención, Centro Nacional de Condiciones del Trabajo, España.